

# Termodinamička analiza akumulacije topline u latentnom spremniku

---

Trp, Anica

Doctoral thesis / Disertacija

2002

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:188:806631>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka Library - SVKRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET**

**TERMODINAMIČKA ANALIZA AKUMULACIJE  
TOPLINE U LATENTNOM SPREMNIKU**

Doktorska disertacija

Anica Trp

Mentor: Red. prof. dr. sc. Bernard Franković

Rijeka, 2002.

100722076

Sveučilište u Rijeci  
TEHNIČKI FAKULTET  
- Fakultetsko vijeće -  
Klasa:602/04-96/97-01/3  
Ur.br.:2170-57-43-96-10  
Rijeka, 08. siječnja 1997.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci na 3. sjednici (u šk.g. 1996./97.), održanoj dana 23.12.1996., donijelo je sljedeću

ODLUKU

1. Prihvaća se izvješće Stručnog povjerenstva za predlaganje pokretanja postupka stjecanja doktorata znanosti izvan doktorskog studija za pristupnicu mr.sc. ANICU TRP, dipl.ing.

2. Utvrđuje se da mr.sc. Anica Trp, dipl.ing. temeljem kriterija iz čl.51. Zakona o visokim učilištima, može pristupiti izradbi doktorske disertacije izvan doktorskog studija, naslovljene: "TERMODINAMIČKA ANALIZA AKUMULACIJE TOPLINE U LATENTNOM SPREMNIKU"

3. Pristupnici se za mentora određuje izv.prof.dr.sc. Bernard Franković,dipl.ing.



Dec 23  
2002

DUF - 523

Dekan  
*[Signature]*

Prof.dr.sc. Josip Brnić,dipl.ing.



Dostaviti:

1. Mr.sc. Anica Trp
2. Izv.prof.dr.sc. Bernard Franković
3. Voditelj Opće i kadrovske službe
4. Dosje (Evidencija studija)
5. Arhiva F.V.

420710033

## SAŽETAK

U radu je analiziran fizikalni proces nestacionarne izmjene topline pri spremanju i korištenju topline iz latentnog spremnika. Promatranjem toplinskih pojava u elementarnom dijelu spremnika, koje podrazumijevaju međusobnu ovisnost nestacionarnog problema prisilne konvekcije između fluida i stijenke cijevi, provođenja topline kroz stijenkku te izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline, postavljen je matematički model. Diferencijalne jednačbe strujanja i prijelaza topline fluida, diferencijalna jednačba provođenja topline kroz stijenkku te diferencijalna entalpijska jednačba akumulatora topline, uz definirane početne i rubne uvjete, diskretizirane su primjenom numeričke metode kontrolnih volumena. Dobiveni su sustavi algebarskih jednačbi riješeni iteracijski kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u. Numerička je analiza primijenjena na model latentnog spremnika korišten u provedenim laboratorijskim istraživanjima, čiji je cilj bio provjera valjanosti definiranog numeričkog modela. Usporedbom vremenskih promjena temperatura dobivenih numeričkim proračunom i eksperimentalnim putem utvrđena je zadovoljavajuća podudarnost rezultata. Za određivanje iskoristivosti latentnog spremnika topline primijenjena je eksergijska analiza zasnovana na drugom glavnom zakonu termodinamike. Numeričkim su proračunom nestacionarne izmjene topline unutar spremnika dobivena temperaturna polja te pomicanja granice područja taljenja odnosno skrućivanja u različitim vremenskim intervalima čime je simulirano toplinsko ponašanje spremnika. Nizom numeričkih proračuna u radu je analiziran i utjecaj različitih pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na količinu spremljene odnosno iskorištene topline te eksergijsku iskoristivost latentnog spremnika.

## SUMMARY

A physical process of transient heat transfer during charging and discharging of the latent heat storage unit has been analysed in this paper. A mathematical model has been set by observing heat phenomena of the conjugate problem of transient forced convection between heat transfer fluid and the wall, heat conduction through the wall and the heat exchange of the phase change material in the elementary storage section. Differential equations of flow and heat transfer of the heat transfer fluid, differential equation of heat conduction through the wall and differential enthalpy equation of the phase change material, with initial and boundary conditions, have been discretised by a control volume approach. The obtained set of algebraic equations has been solved by *Fortran* software using the iterative procedure. Numerical analysis has been applied to the model of latent heat storage unit, used in experimental investigations, to validate the defined numerical model. Mutual agreement has been established between numerically and experimentally obtained timewise temperature variations. An exergy analysis, based on the second law of thermodynamics, has been applied for determining the efficiency of the storage unit. Temperature fields and melting i.e. solidification fronts in different time periods have been obtained by numerical calculation of transient heat transfer in the storage unit and thermal behaviour of the heat storage unit has been simulated. A series of numerical procedures has been performed in order to analyse the influence of different operating conditions and construction parameters on the amount of charged i.e. discharged energy and exergy efficiency of the latent heat storage unit.

## PREDGOVOR

Cilj je doktorske disertacije naslovljene *Termodinamička analiza akumulacije topline u latentnom spremniku* produbljivanje dosadašnjih saznanja te doprinos analizi fizikalnih pojava nestacionarne izmjene topline pri punjenju i pražnjenju latentnog spremnika topline. U tu je svrhu, nakon uvodnih razmatranja, u ovome radu naveden pregled dosadašnjih istraživanja i razvoja teorije izmjene topline unutar latentnog spremnika što je obuhvaćeno drugim poglavljem. Matematički model nestacionarnih toplinskih pojava unutar latentnog spremnika u vektorskom i diferencijalnom obliku, s pripadnim početnim i rubnim uvjetima postavljen je u trećem poglavlju rada. Numeričko rješenje postavljenog matematičkog modela primjenom numeričke metode kontrolnih volumena opisano je u četvrtom poglavlju rada. U svrhu provjere definiranog matematičkog modela predmetno je istraživanje obuhvatilo i postavljanje i izvođenje eksperimenta, pa su eksperimentalna naprava i izvršeno mjerenje opisani u petom poglavlju rada. Šesto poglavlje obrađuje primjenu numeričke analize na latentni spremnik na kojem su vršena eksperimentalna istraživanja te usporedbu rezultata dobivenih numeričkim proračunom i eksperimentalnim putem. U sedmom je poglavlju rada opisana analiza utjecaja pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na izmjenu topline u latentnom spremniku dobivena nizom numeričkih proračuna. Pri tome je analiziran utjecaj brzine strujanja i ulazne temperature fluida, duljine i radijusa vanjske cijevi spremnika te vremena taljenja i skrućivanja na karakteristike latentnog spremnika. Zaključna su razmatranja navedena u osmom poglavlju rada, a u devetom je poglavlju rada naveden popis korištene literature.

Ovom se prilikom želim zahvaliti svima koji su pomogli pri izradi ovoga rada. U prvom redu, zahvaljujem se mentoru red. prof. dr. sc. Bernardu Frankoviću, dipl. ing. na stručnom usmjeravanju, nizu korisnih savjeta i pomoći pri izradi doktorske disertacije. Također, zahvaljujem se i kolegi znanstvenom novaku Kristianu Leniću, dipl. ing. na nesebičnoj pomoći pri izvođenju eksperimentalnog dijela istraživanja te pri grafičkoj obradi rezultata. Na kraju, zahvaljujem se i svima ostalima koji su na različite načine pomogli da se ovaj rad uspješno privede kraju.

U Rijeci, srpanj 2001.

*Autorica*

## Sadržaj:

<b>1</b>	<b>UVOD</b> .....	1
<b>2</b>	<b>PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA I RAZVOJA TEORIJE IZMJENE TOPLINE UNUTAR LATENTNOG SPREMNIKA</b> .....	3
<b>3</b>	<b>MATEMATIČKI MODEL IZMJENE TOPLINE U LATENTNOM SPREMNiku</b> .....	7
	3.1 Fizikalni model .....	7
	3.2 Vektorski oblik matematičkog modela .....	9
	3.3 Diferencijalni oblik matematičkog modela .....	10
	3.4 Bezdimenzijski oblik diferencijalnih jednačbi .....	14
<b>4</b>	<b>NUMERIČKO RJEŠENJE POSTAVLJENOG MATEMATIČKOG MODELA</b> .....	21
	4.1 Diferencijalni i integralni oblik opće jednačbe očuvanja .....	21
	4.2 Metoda kontrolnih volumena za proračun nestacionarnih problema strujanja i prijelaza topline .....	23
	4.2.1 Formulacija kontrolnog volumena .....	23
	4.2.2 Jednačbe diskretizacije za proračun nestacionarnog dvodimenzijskog polja strujanja fluida u cilindričnom koordinatnom sustavu .....	24
	4.2.3 Jednačbe diskretizacije za proračun nestacionarnog temperaturnog polja fluida, stijenke i akumulatora topline latentnog spremnika u cilindričnom koordinatnom sustavu .....	35
	4.3 Proračun eksergijske iskoristivosti spremnika latentne topline .....	45
	4.4 Rješavanje sustava algebarskih jednačbi .....	47
	4.4.1 Sustavi algebarskih jednačbi za proračun polja strujanja fluida te temperaturnog polja fluida, stijenke i akumulatora topline unutar latentnog spremnika .....	47
	4.4.2 Opis kompjuterskog programa .....	48
<b>5</b>	<b>POSTAVLJANJE I IZVOĐENJE EKSPERIMENTALOG DIJELA ISTRAŽIVANJA</b> .....	49
	5.1 Radne tvari za spremanje toplinske energije .....	49
	5.1.1 Parafini .....	51
	5.1.2 Neparafinski organski spojevi .....	51
	5.1.3 Hidrati soli .....	52
	5.1.4 Eutektici .....	54
	5.1.5 Kompatibilnost radnih tvari s konstrukcijskim materijalima spremnika .....	55
	5.2 Opis eksperimentalne naprave .....	56
	5.3 Analiza greške mjerenja .....	58
	5.3.1 Određivanje mjerne nesigurnosti .....	58
	5.3.2 Kontrolna mjerenja termoelemenata .....	62
	5.4 Opis izvršenog mjerenja .....	67

5.4.1 Mjerenja pri procesu taljenja akumulatora topline (proces spremanja topline) .....	69
5.4.2 Mjerenja pri procesu skrućivanja akumulatora topline (proces korištenja topline) .....	73
<b>6 PRIMJENA NUMERIČKE ANALIZE NA LATENTNI SPREMNIK NA KOJEM SU VRŠENA EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1 Usporedba rezultata numeričkog i eksperimentalnog istraživanja .....</b>	<b>77</b>
<b>6.2 Rezultati numeričke analize .....</b>	<b>85</b>
6.2.1 Proračun polja strujanja fluida .....	85
6.2.2 Proračun temperaturnog polja pri procesu taljenja akumulatora topline .....	88
6.2.2.1 Konstantna temperatura taljenja akumulatora topline .....	88
6.2.2.2 Temperaturni interval taljenja akumulatora topline .....	99
6.2.3 Proračun temperaturnog polja pri procesu skrućivanja akumulatora topline .....	110
<b>7 ANALIZA UTJECAJA POGONSKIH UVJETA I KONSTRUKCIJSKIH PARAMETARA NA KARAKTERISTIKE LATENTNOG SPREMNIKA ...</b>	<b>125</b>
<b>7.1 Utjecaj brzine strujanja fluida na izmjenu topline u latentnom spremniku .....</b>	<b>125</b>
7.1.1 Taljenje akumulatora topline .....	125
7.1.2 Skrućivanje akumulatora topline .....	128
<b>7.2 Utjecaj ulazne temperature fluida na izmjenu topline u latentnom spremniku ..</b>	<b>131</b>
7.2.1 Taljenje akumulatora topline .....	131
7.2.2 Skrućivanje akumulatora topline .....	134
<b>7.3 Utjecaj duljine cijevi spremnika na izmjenu topline u latentnom spremniku .....</b>	<b>136</b>
7.3.1 Taljenje akumulatora topline .....	136
7.3.2 Skrućivanje akumulatora topline .....	139
<b>7.4 Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na izmjenu topline u latentnom spremniku .....</b>	<b>141</b>
7.4.1 Taljenje akumulatora topline .....	141
7.4.2 Skrućivanje akumulatora topline .....	144
<b>7.5 Utjecaj vremena taljenja i skrućivanja na izmjenu topline u latentnom spremniku .....</b>	<b>146</b>
7.5.1 Taljenje akumulatora topline .....	146
7.5.2 Skrućivanje akumulatora topline .....	149
<b>8 ZAKLJUČAK .....</b>	<b>153</b>
<b>9 LITERATURA .....</b>	<b>155</b>
<b>POPIS OZNAKA .....</b>	<b>159</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>163</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>167</b>

## 1 Uvod

Učinkovito gospodarenje energijom jedna je od najaktualnijih tema sadašnjeg vremena. Budući da energija iz fosilnih goriva nije neiscrpna, te da izgaranje fosilnih goriva doprinosi stvaranju efekta staklenika a time i uništavanju okoliša, sve se više pažnje poklanja razvoju obnovljivih izvora energije gdje sunčeva energija zauzima poseban značaj. Međutim, potreba za energijom i dozračena sunčeva energija često su u vremenskom raskoraku te je jedan od bitnijih zadataka pri upotrebi sunčeve energije rješavanje raskoraka između vremena dozračivanja i vremena korištenja energije. Ovaj se problem nastoji riješiti akumulacijom topline u toplinskim spremnicima. Toplina se u toplinskim spremnicima može akumulirati na više načina:

- zagrijavanjem radne tvari odnosno povećanjem njezine unutarnje energije - spremnici senzibilne (osjetne) topline,
- promjenom agregatnog stanja krutih i kapljevitih tvari odnosno korištenjem latentne topline taljenja i skrućivanja odnosno isparivanja i kondenzacije - spremnici latentne topline i
- korištenjem raznih kemijskih reakcija kojima se oslobađa odnosno veže toplina.

Ugradnja prikladnog sustava za spremanje energije u energetske sustave može znatno poboljšati gospodarenje energijom i pomoći pri razmimoilaženju vremena opskrbe i potražnje.

Pri izboru radne tvari za spremanje topline (akumulatora topline), uz geometriju, bitna su i njezina kemijsko-fizikalna svojstva kao što su toplinski kapacitet, gustoća, toplinska vodljivost, izmjenično grijanje i hlađenje, kemijska i geometrijska stabilnost te nezapaljivost, nekoroziivnost i netoksičnost.

U današnje se vrijeme u području toplinske tehnike, posebno u području toplinske konverzije sunčeve energije, sve više razvija primjena spremnika latentne topline kod kojih se toplina pohranjuje odnosno oslobađa u vremenu kada radna tvar mijenja agregatno stanje (kruto - kapljevito), pri čemu u slučaju jednodimenzionalnih radnih tvari temperatura ostaje konstantna. Toplina taljenja odnosno skrućivanja radne tvari treba biti što veća jer se time smanjuje njena potrebna količina za akumulaciju zahtijevane količine energije. Relativno mali volumen i uski temperaturni interval osnovne su prednosti latentnih spremnika pri akumulaciji topline. Kada se radna tvar nalazi u krutom kristalnom stanju molekule su poredane u kristalnoj rešetki i titraju oko položaja koji su određeni minimalnom potencijalnom energijom molekule. Dovođenjem topline radnoj tvari raste titranje i srednja kinetička energija što se očituje kao porast temperature tvari. Kada temperatura dosegne veličinu temperature taljenja uzbuda molekula dovoljno je velika da većina molekula napusti svoja mjesta u rešetki i rešetka se počinje raspadati tj. tvar se tali. Sve dok se sva tvar ne rastali, energija koja se u obliku topline dovodi tvari troši se na gibanje i sudaranje molekula i uvjetuje povećanje potencijalne energije molekula, a srednja kinetička energija (dakle i temperatura) pri tom ostaje konstantna. Kada se sva tvar rastali, daljnje dovođenje topline povećava temperaturu kapljevine. Na ovaj se način vrši pohranjivanje dovedene energije. U periodu korištenja energije pohranjena se energija vraća natrag hlađenjem tj. promjenom kapljevitog u prvobitno kruto stanje radne tvari. Temperatura taljenja (skrućivanja) radne tvari mora biti viša od temperature grijanja odnosno niža od temperature hlađenja kako bi se omogućila željena izmjena topline. Danas su u primjeni dvije grupe tvari za akumulaciju latentne topline: hidrati soli (npr. natrijev bifosfat, kalcij klorid heksahidrat, natrijev sulfat) i organske tvari (npr. laurinska kiselina, palmolinska kiselina, parafinski vosak). Najčešći tipovi

spremnika latentne topline su spremnici sastavljeni iz polietilenskih ili polipropilenskih cijevi, te spremnici ispunjeni polietilenskim kuglama u kojima se nalazi radna tvar za akumulaciju topline. Osnovni je zadatak pri proračunu toplinskog spremnika, kojega možemo smatrati posebnim tipom izmjenjivača topline, određivanje izmijenjene odnosno akumulirane topline te toplinskog stupnja djelovanja. Za tu je svrhu potrebno izvršiti detaljnu termodinamičku analizu odnosno odrediti točnu temperaturnu raspodjelu unutar spremnika topline.

U ovom je radu postavljen matematički model fizikalnih pojava izmjene topline unutar spremnika latentne topline. Postavljene diferencijalne jednadžbe strujanja i prijelaza topline fluida, stijenke i akumulatora topline, uz definirane početne i rubne uvjete, diskretizirane su primjenom numeričke metode kontrolnih volumena, te su dobiveni sustavi algebarskih jednadžbi riješeni iteracijski kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u. Numerička je analiza primijenjena na model spremnika latentne topline korišten u laboratorijskim istraživanjima te je izvršena usporedba rezultata dobivenih numeričkim i eksperimentalnim putem. Za određivanje iskoristivosti spremnika latentne topline primijenjena je eksergijska analiza zasnovana na drugom glavnom zakonu termodinamike kojom je uzeta u obzir ne samo količina već i kvaliteta odnosno radna sposobnost akumulirane energije. U nastavku rada nizom je numeričkih proračuna analiziran utjecaj različitih pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na količinu spremljene i iskorištene topline te eksergijsku iskoristivost spremnika.

## 2 Pregled dosadašnjih istraživanja i razvoja teorije izmjene topline unutar latentnog spremnika

Jednodimenzijski problem fazne promjene akumulacijske mase prvi je opisao Stefan 1889. godine, pa je problem izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja po njemu nazvan Stefanovim problemom [1]. Analitička rješenja moguća su samo za ograničenu skupinu Stefanovih problema. Numeričke sheme zahtijevaju vrlo precizno tretiranje pomične granice krute i kapljevite faze. Jedan od načina rješavanja ovog problema opisan je u radovima Vollera i Crossa [1], Vollera, Crosa i Markatosa [2] te Vollera [3] uvođenjem entalpijske metode po kojoj se Fourierova jednadžba provođenja topline, kojom je opisana izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja, transformira uvođenjem entalpija umjesto temperatura. Prednost je ove metode u tome što nije potrebno definirati rubni uvjet na granici krute i kapljevite faze i nije potrebno zasebno promatrati ova dva područja (kruto i kapljevito). Transformacija jednadžbe provođenja topline u nelinearnu entalpijsku jednadžbu primjenom Kirchhoffovih transformacija i transformacija koordinata opisana je u radu Huntera i Kuttlera [4]. Hsu, Sparrow i Patankar u radu [5] riješili su problem pomične granice faza pri numeričkom rješavanju nestacionarnog dvodimenzijskog skrućivanja (pri čemu se izmjena topline dominantno odvija provođenjem) imobilizacijom granice primjenom transformiranog koordinatnog sustava tj. neortogonalnog koordinatnog sustava koji se postavlja tako da granica faza postane nepomična (stacionarna) u transformiranom koordinatnom sustavu. Transformaciju energijske jednadžbe, koja uz difuzijski sadrži i konvektivni član, u nelinearnu entalpijsku jednadžbu za rješavanje Stefanovog problema opisali su Cao, Faghri i Chang u radu [6], te Lee i Tzong u radu [7]. Opisana je entalpijska metoda pogodna za probleme u kojima se promjena faze vrši kod konstantne temperature, kao i za probleme kod kojih se promjena faze vrši unutar određenog temperaturnog intervala. Dosadašnjim istraživanjima izmjene topline unutar latentnog spremnika zaključeno je da je izmjena topline u spremniku latentne topline proces koji podrazumijeva međusobnu ovisnost, a time i istovremenost rješavanja, problema izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja i problema izmjene topline putem prisilne konvekcije između stijenke i fluida. Pri tome se pretpostavlja potpuno izobraženo strujanje fluida, a fluid se smatra nestišljivim. Istraživanja su bila usmjerena na izmjenu topline provođenjem unutar akumulatora topline te proračun izmjene topline konvekcijom između fluida i akumulatora topline korištenjem empirijskih izraza za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom. Chen i Chiou su u radu [8] proučavali prijelaz topline konvekcijom pri laminarnom i turbulentnom strujanju tekućih metala kroz cijev te su izveli empirijske korelacije za proračun koeficijenta prijelaza topline za granične uvjete konstantnog toplinskog toka ili konstantne temperature stijenke. Sparrow i Hsu [9] numerički su analizirali povezani problem nestacionarnog prijelaza topline konvekcijom i prijelaza topline pri promjeni agregatnog stanja za dvodimenzijsko skrućivanje na vanjskoj strani hladne cijevi s konstantnim koeficijentom prijelaza topline za rashladni medij. Akumulator topline s vanjske strane cijevi promatran je kao beskonačno velike debljine, te početno u kapljevitom agregatnom stanju na temperaturi skrućivanja. Provođenje topline kroz stijenkiju cijevi također je promatrano kao beskonačno velike vrijednosti. Cao i Faghri [10] analizirali su izmjenu topline između akumulatora topline i fluida u izmjenjivaču oblika koncentrične cijevi (cijev u cijevi) pri čemu je akumulator topline unutar vanjske cijevi bio konačne debljine. Numeričkim je putem analiziran nestacionarni dvodimenzijski problem prijelaza topline konvekcijom i izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja za radni medij s malim Pr brojem tj. tekući metal. Navedeni se



spremnik latentne topline primjenjuje u svemirskoj tehnologiji. U numeričku je analizu uključen i utjecaj provođenja topline kroz stijenkiju cijevi. Prijelaz topline konvekcijom za dvodimenzijnski nestacionarni nestišljivi laminarni tok opisan je diferencijalnim jednadžbama strujanja i prijelaza topline, a izmjena topline unutar akumulatora topline opisana je modelom transformirane temperature [11]. Isti su autori numerički analizirali i izmjenu topline za slučaj turbulentnog toka radnog medija s malim Pr brojem u radu [12]. U ovim je modelima pretpostavljeno da je vanjska cijev potpuno izolirana tj. zanemareni su njeni gubici topline. Isti je tip spremnika latentne topline analizirao i Lacroix u radu [13], te Bellecci i Conti u radovima [14], [15] i [16]. Prisilna konvekcija s fluida na stijenkiju u njihovim je matematičkim modelima opisana standardnim eksperimentalnim izrazima, pa nije računato polje strujanja. Izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja opisana je primjenom entalpijske metode čime su izbjegnute poteškoće definiranja pomične granice krute i kapljevite faze unutar akumulatora topline odnosno zadovoljavanja rubnog uvjeta na granici faza. Zhang i Faghri u radu [17] poluanalitički su riješili model izmjene topline unutar koncentričnog spremnika. U radu je analiziran fizikalni model za vodu kao radni medij (veliki Pr broj) budući da se voda kao fluid koristi u većini niskotemperaturnih spremnika topline kao što su spremnici topline u solarnim sustavima. Prisilna konvekcija u ovom je modelu promatrana kao niz stacionarnih dvodimenzijnskih problema prisilne konvekcije s konstantnim profilom brzina, a taljenje akumulatora topline kao niz jednodimenzijnskih problema taljenja u radijalnom smjeru. Zaključeno je da laminarni prisilni tok unutar cijevi nikada ne postiže toplinski razvijeno stanje. Prema tome Nusseltova se značajka mijenja tijekom vremena i ograničena je vrijednostima Nusseltovih značajki za slučaj konstantnog toplinskog toka i za slučaj jednolike temperature stijenke. Hsieh je u radu [18] analitičkim putem, korištenjem metode izvora i ponora, analizirao jednodimenzijnski Stefanov problem s pomičnom toplinskom frontom koja se kreće konstantnom brzinom u zadanom smjeru. Problem je transformiran u pomične koordinate i analitičko je rješenje dobiveno primjenom Laplaceovih transformacija. Živković i Fujii su u radu [19] numerički analizirali izmjenu topline unutar spremnika napravljenog u obliku pločastog izmjenjivača topline. U promatranom je slučaju zanemareno provođenje topline unutar akumulatora topline u smjeru struje fluida pa je problem razmatran kao nestacionarni, jednodimenzijnski. U radu je uspoređeno potrebno vrijeme taljenja akumulatora topline unutar spremnika u obliku kvadra i spremnika cilindričnog oblika za iste volumene i površine izmjene topline te je zaključeno da se taljenje akumulatora topline u spremniku oblika kvadra vrši skoro dva puta brže od taljenja u spremniku cilindričnog oblika. U radu [20] numerički je analiziran nestacionarni dvodimenzijnski problem izmjene topline u spremniku oblika koncentrične cijevi s vodom kao fluidom i kalcij klorid heksahidratom kao akumulatorom topline. Budući da je vodljivost topline akumulatora topline koji se obično koriste u spremnicima latentne topline relativno mala, u nekim je radovima proučavano poboljšanje izmjene topline dodavanjem rebara u prostor spremnika koji ispunjava akumulator topline. Henze i Humphrey su u radu [21] opisali pojednostavljeni nestacionarni dvodimenzijnski model za određivanje udjela taline i položaja granice taljenja u spremniku s tankim orebrenjem u prostoru kojega ispunjava akumulator topline. Lacroix je u radu [22] proučavao prijelaz topline unutar spremnika latentne topline u obliku koncentrične cijevi s orebrenjem vanjske stijenke unutarnje cijevi tj. u prostoru koji ispunjava akumulator topline. Dvodimenzijnski problem izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja riješen je primjenom entalpijske metode uz istovremeno rješavanje konvektivnog prijelaza topline između fluida i akumulatora topline korištenjem standardnih korelacija za proračun koeficijenta prijelaza topline konvekcijom. Rezultati su pokazali da su prstenasta rebra najučinkovitija za srednje protoke (0,0015 - 0,015 kg/s) i male

ulazne temperature fluida ( $\Delta T_{in}=+5K$ ). Zhang i Faghri proučavali su isti problem u radu [23] korištenjem modela transformirane temperature za proračun izmjene topline pri taljenju akumulatora topline i poluanalitičke metode za proračun prijelaza topline s fluida unutar cijevi. Autori su zaključili da dodavanje rebara u prostor spremnika koji ispunjava akumulator topline efikasno poboljšava prijelaz topline ukoliko se koristi fluid s velikim koeficijentom toplinske vodljivosti, budući da se najveći toplinski otpori u spremniku latentne topline javljaju unutar fluida, a ne unutar akumulatora topline. Prema tome zaključeno je da je efikasniji način poboljšanja izmjene topline pospješivanje prisilne konvekcije unutar cijevi. Jedan je od načina za poboljšanje prisilne konvekcije fluida postavljanje rebara unutar cijevi tj. u prostor kojim protječe fluid. Ovakav je pristup izučavan i u radu Zhanga i Faghrija [24]. Taljenje akumulatora topline i prijelaz topline konvekcijom analizirani su primjenom modela transformirane temperature i poluanalitičke metode, a provođenje topline kroz rebra promatrano je kao nestacionarno i dvodimenzijnsko. Rezultati ukazuju da je dodavanje unutarnjih rebara efikasan način za poboljšanje prijelaza topline unutar spremnika latentne topline u slučaju kada fluid ima mali koeficijent toplinske vodljivosti i pri malim Re brojevima. Poboljšanje prijelaza topline pri skrućivanju akumulatora topline – parafina unutar cilindrične vertikalne cijevi postavljanjem rebara na stranu akumulatora topline analizirano je teoretski i eksperimentalnim putem u radu Velraja i ostalih [25] pri čemu je posebno analiziran razmještaj rebara. Za parafin je postavljen nestacionarni dvodimenzijnski model korištenjem entalpijske formulacije. Zaključeno je da postavljanje rebara doprinosi poboljšanju prijelaza topline.

Gong i Mujumdar u radu [26] metodom konačnih elemenata analizirali su jednodimenzijnski model izmjene topline pri promjeni faze za slučaj cikličkog taljenja i skrućivanja unutar jedne ili više složenih ploča unutar kojih se nalaze akumulatori topline s različitim temperaturama taljenja. Zaključili su da se količine izmijenjene topline pri punjenju odnosno pražnjenju spremnika mogu znatno povećati korištenjem ploča s akumulatorima topline s različitim temperaturama taljenja. Iznos povećanja ovisi o razmještaju akumulatora topline, toplinskim svojstvima i postavljenim rubnim uvjetima. Vick, Nelson i Yu u radu [27] analizirali su problem taljenja i skrućivanja s višestrukim granicama faza primjenom metode rubnih elemenata. Problem uključuje strujanje fluida kroz dugačku cijev oko koje se nalazi akumulator topline. Temperatura fluida na ulazu u cijev ciklički se mijenja s vrijednostima iznad i ispod temperature taljenja odnosno skrućivanja akumulatora topline uzrokujući naizmjenično formiranje i premještanje slojeva kapljevine i slojeva krutine. U radu je simulirano pomicanje granica taljenja i skrućivanja tijekom vremena. Pri tome je zanemareno aksijalno provođenje unutar akumulatora topline i problem je diskretiziran po aksijalnim segmentima te je svaki od segmenata promatran kao nestacionarni jednodimenzijnski problem. Osim za spremanje toplinske energije spremnik latentne topline moguće je upotrijebiti i za spremanje električne energije. U radu [28] Laouadi i Lacroix analizirali su jednodimenzijnski model spremnika latentne topline u kojem se promjenom faze akumulatora topline zadovoljavaju energijske potrebe za grijanje domaćinstva u vrijeme vršnih opterećenja. Budući da velik utjecaj na iskoristivost spremnika latentne topline ima pravilan odabir akumulatora topline u brojnim su radovima analizirani utjecaji fizikalnih svojstava različitih vrsta akumulatora topline na toplinsko ponašanje spremnika. Ghoneim je u radu [29] analizirao utjecaj korištenja vode i zraka kao fluida te parafinskog voska i hidrata soli kao akumulatora topline na toplinsko ponašanje spremnika. Hoogendoorn i Bart u radu [30] eksperimentalnim i numeričkim putem analizirali su mogućnost spremanja latentne topline korištenjem organskih akumulatora topline kao što su parafini i masne kiseline. Ponašanje parafinskog voska pri taljenju, tj. pomicanje granice taljenja, eksperimentalno i numerički

analizirali su Das i Dutta u radu [31]. U radu [32] opisana su eksperimentalna istraživanja procesa spremanja latentne topline vršena korištenjem palmitinske kiseline kao akumulatora topline. U radovima [33], [34] i [35] analizirano je toplinsko ponašanje spremnika pri korištenju hidrata soli kao akumulatora topline, dok je u radu [36] analiziran utjecaj korištenja različitih vrsta akumulatora topline te modela latentnog spremnika na proces izmjene topline. U radu [37] eksperimentalnim i numeričkim putem razmatrano je korištenje hidrata soli kao akumulatora topline u sustavu zidne stijenke za solarno zagrijavanje koja je sastavljena od transparentog izolacijskog materijala i staklenog spremnika ispunjenog akumulatorom topline.

Za određivanje iskoristivosti spremnika topline primjenjuje se eksergijska analiza zasnovana na drugom glavnom zakonu termodinamike kojim se uzima u obzir ne samo količina već i kvaliteta odnosno radna sposobnost akumulirane energije. Pri tome se vrše istraživanja usmjerena na povećanje eksergijske iskoristivosti toplinskog spremnika. Eksergijsku analizu za određivanje iskoristivosti zatvorenog sustava za spremanje toplinske energije postavljanjem eksergijskih bilanci opisali su Rosen, Hooper i Barbaris u radu [38] i zaključili su da uporaba eksergijske analize jasno uzima u obzir gubitak radne sposobnosti akumulirane topline te tako puno korektnije izražava termodinamičku i ekonomsku vrijednost procesa akumulacije energije. De Lucia i Bejan u radu [39] eksergijsku su analizu proveli definiranjem ukupnih nepovratnosti spremnika latentne topline budući da je njegova eksergijska iskoristivost maksimalna onda kada su nepovratnosti minimalne. U radu su promatrali samo proces taljenja tj. proces spremanja energije akumulatora topline. Zaključeno je da je eksergijska iskoristivost maksimalna u slučaju kada je temperatura taljenja akumulatora topline jednaka geometrijskoj sredini ulazne temperature fluida i temperature okoliša. Eksergijsku analizu ukupnog ciklusa osjetnog spremnika topline koji uključuje proces punjenja i proces pražnjenja spremnika opisali su Gunnewiek, Nguyen i Rosen u radu [40] postavljanjem eksergijskih bilanci, te Krane u radu [41] principom minimizacije stvaranja entropije. Bellecci i Conti u radu [42] numeričkim su putem analizirali iskoristivost spremnika latentne topline. Zaključili su da eksergijska analiza spremnika mora uzimati u obzir cikličku izmjenu procesa punjenja i procesa pražnjenja spremnika. Također, uočili su da se, u slučaju kada je spremnik topline serijski spojen s toplinskim strojem, minimalne nepovratnosti i stabilnost rada ukupnog sustava međusobno ne podudaraju, pa se u tom slučaju pristup povećanja eksergijske iskoristivosti tj. optimalnog dimenzioniranja spremnika minimalnim stvaranjem entropije ne može smatrati zadovoljavajućim. Watanabe i Kanzawa u radu [43] zaključili su da se količine izmijenjenih toplina tj. eksergijska iskoristivost spremnika latentne topline može povećati korištenjem više akumulatora topline s različitim temperaturama taljenja. Numeričkim je putem analizirana optimalna raspodjela temperatura taljenja akumulatora topline. Nepovratnosti uzrokovane izmjenom topline u spremniku latentne topline analizirali su i Conti, Bellecci i Charach u radu [44]. U ovom je radu pretpostavljeno da je eksergija tople struje fluida za vrijeme faze punjenja predana u okoliš i potpuno uništena sve dok se djelomično ne akumulira unutar toplinskog spremnika. Provedena je numerička analiza s ciljem minimizacije toplinskih gubitaka procesa punjenja i pražnjenja. Conti i Charach u radu [45] analizirali su utjecaj serijskog i paralelnog tipa spajanja toplinskog izvora, tj. spremnika latentne topline, s toplinskim strojem na eksergijsku iskoristivost spremnika.

Kod svih spomenutih modela, pri matematičkoj formulaciji procesa, uveden je niz pretpostavki i pojednostavljenja, koja nužno uzrokuju određena odstupanja od realnog stanja, te ukazuju na potrebu nastavka istraživanja u ovom području kako bi postavljeni matematički model što točnije opisao stvarno stanje.

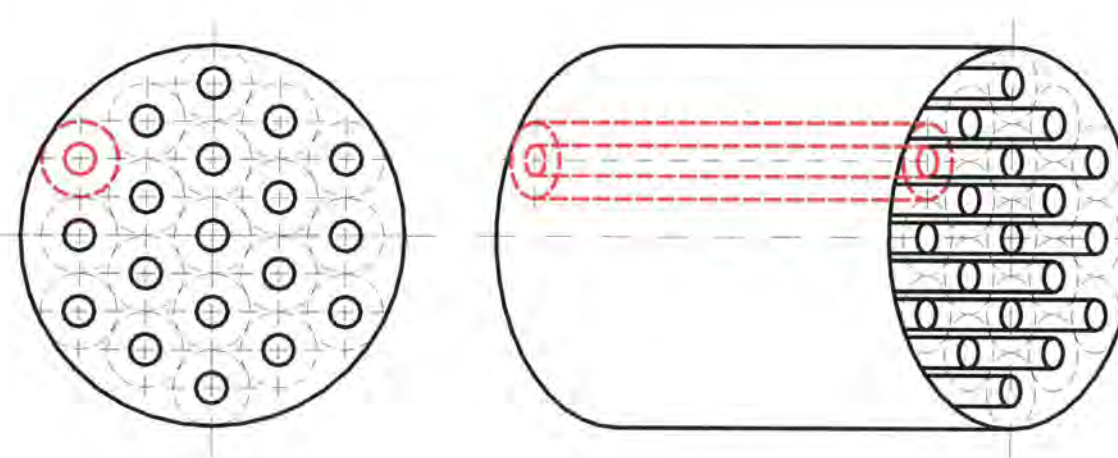
### 3 Matematički model izmjene topline u latentnom spremniku

#### 3.1 Fizikalni model

Termodinamička analiza izmjene topline unutar spremnika latentne topline je složeni fizikalni proces koji podrazumijeva međusobnu ovisnost, a time i istovremenost rješavanja, problema izmjene topline putem prisilne konvekcije između fluida i stijenke, provođenja topline unutar stijenke te problema izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline. Stoga je za formiranje prikladnog matematičkog modela kojim bi se navedene toplinske pojave što točnije opisale potrebno uvesti sljedeće pretpostavke:

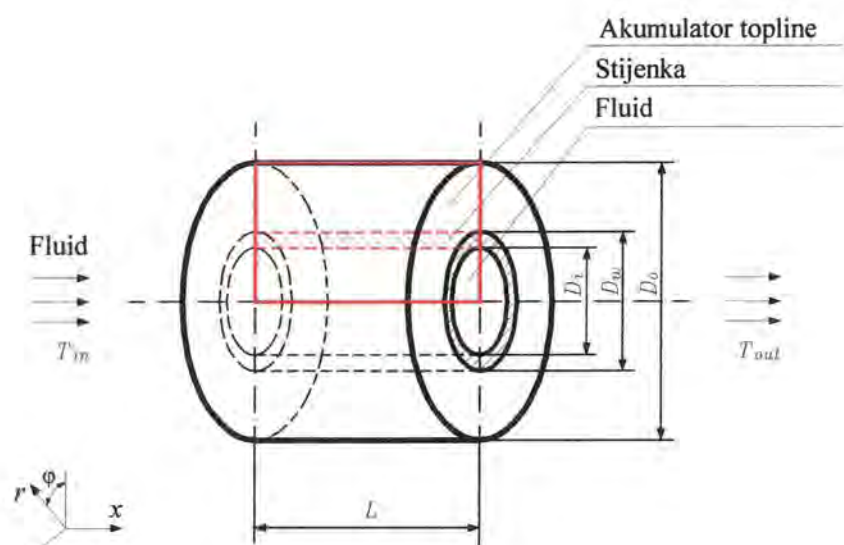
- fluid je nestišljiv i smatra se newtonovskim fluidom,
- tok fluida je laminaran,
- početna temperatura spremnika topline je jednolika i akumulator topline je u stanju krutine,
- ulazna brzina i ulazna temperatura fluida su konstantne,
- zanemaruju se toplinski gubici i provođenje topline kroz vanjsku stijenku spremnika topline tj. pretpostavlja se adijabatska vanjska stijenka,
- prijelaz topline konvekcijom između fluida i stijenke, provođenje topline kroz stijenku cijevi te izmjena topline pri promjeni faze akumulatora topline promatra se kao nestacionarni dvodimenzijski problem,
- problem je osnosimetričan,
- sva su fizikalna svojstva fluida, stijenke i akumulatora topline konstantna,
- zanemaruje se slobodna konvekcija u kapljevitoj fazi akumulatora topline.

Spremnik latentne topline analiziran u ovom radu je izmjenjivač topline izveden kao cilindar unutar kojeg su smještene cijevi.



Slika 1. Spremnik latentne topline

Fluid protječe kroz cijevi i izmjenjuje toplinu s akumulatorom topline koji se nalazi oko cijevi. Za vrijeme grijanja, topli fluid zagrijava akumulator topline koji se pri tome tali i na taj način akumulira toplinu. Za vrijeme hlađenja, akumulatoru topline se toplina odvodi i on se skrućuje predajući pri tome toplinu hladnom fluidu. Cijevi su unutar spremnika smještene na taj način da se oko svake može opisati kružnica koja ograničava područje u kojemu se toplina fluida iz pojedine cijevi predaje akumulatoru topline koji se nalazi u tom području. Pri tome se vidi da je vrlo mala količina akumulatora topline izvan ograničenih područja. Za matematičko opisivanje fizikalnog problema izmjene topline unutar spremnika dovoljno je stoga promatrati samo jedan segment spremnika latentne topline npr. segment na slici 1 označen crvenom bojom. Površine dodira akumulatora topline u pojedinim segmentima mogu se pri tome promatrati kao adijabatske granice.



Slika 2. Segment spremnika latentne topline

Segment spremnika koji će biti analiziran u nastavku, s pripadnim cilindričnim koordinatnim sustavom, prikazan je na slici 2. Na slici je naznačen smjer strujanja fluida kao i područja koja zauzimaju fluid i akumulator topline te stijenka cijevi. Izmjena topline unutar segmenta spremnika latentne topline je međuovisni problem nestacionarne prisilne konvekcije između fluida i stijenke cijevi što se opisuje Oberbeckovim matematičkim modelom, provođenja topline kroz stijenku cijevi te izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline. Izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja dominantno se odvija provođenjem pa se opisuje Fourierovom diferencijalnom jednačbom provođenja topline. Budući da se promjene temperatura fluida, stijenke i akumulatora topline u smjeru kuta zakreta s dovoljnom točnošću mogu zanemariti te da je problem osnosimetričan, područje koje će biti obuhvaćeno numeričkim proračunom na slici 2 uokvireno je crvenom bojom.

### 3.2 Vektorski oblik matematičkog modela

Matematički model izmjene topline unutar latentnog spremnika temelji se na osnovnim zakonima fizike a to su zakon očuvanja mase, Newtonov drugi zakon gibanja tj. zakon očuvanja količine gibanja prema kojem je iznos vremenske promjene količine gibanja jednak sumi sila koje djeluju na elementarnu česticu fluida i prvi zakon termodinamike tj. zakon očuvanja energije prema kojem je iznos vremenske promjene energije jednak sumi dovedene topline i izvršenog rada na čestici fluida. Ovaj se matematički model u vektorskom obliku, uz pretpostavke navedene u poglavlju 3.1, može izraziti na sljedeći način

- **fluid**

- jednačba očuvanja mase (jednačba kontinuiteta)

$$\nabla \cdot \vec{w} = 0 \quad (3.1)$$

- jednačbe očuvanja količine gibanja (Navier – Stokesove jednačbe)

$$\frac{D\vec{w}}{Dt} = -\frac{1}{\rho_f} \cdot \nabla p + \nu_f \cdot \nabla^2 \vec{w} \quad (3.2)$$

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_f \cdot c_f \cdot \frac{DT_f}{Dt} = \lambda_f \cdot \nabla^2 T_f \quad (3.3)$$

- **stijenka**

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_w \cdot c_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \cdot \nabla^2 T_w \quad (3.4)$$

- **akumulator topline**

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_p \cdot c_p \cdot \frac{\partial H_p}{\partial t} = \lambda_p \cdot \nabla^2 H_p \quad (3.5)$$

U gore navedenim formulama (3.2) i (3.3) vrijednost  $\frac{D}{Dt}$  predstavlja substancijalnu derivaciju varijable, a smatra se derivacijom koja slijedi gibanje fluida. Može se interpretirati kao vremenska promjena varijable fluida ili varijable protoka duž puta elementa fluida. Budući da je npr.  $\Psi = \Psi(x, r, t)$  slijedi

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \Psi}{\partial r} \cdot \frac{dr}{dt} \quad (3.6)$$

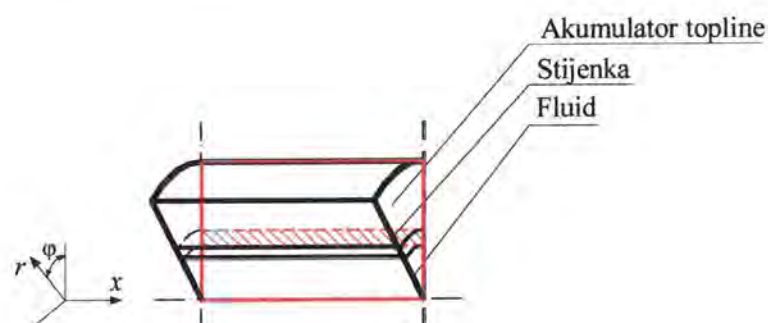
Čestica fluida slijedi tok pa je  $\frac{dx}{dt} = w_x$ ,  $\frac{dr}{dt} = w_r$ . Prema tome slijedi

$$\frac{D\Psi}{Dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial t} + w_x \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial x} + w_r \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial r} \quad (3.7)$$

gdje član  $\frac{\partial\Psi}{\partial t}$  predstavlja lokalnu promjenu varijable, a član  $w_x \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial x} + w_r \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial r}$  promjenu varijable uslijed konvekcije.

### 3.3 Diferencijalni oblik matematičkog modela

Na slici 3 koja slijedi prikazan je odsječak segmenta spremnika latentne topline s pripadnim cilindričnim koordinatnim sustavom. Na izdvojenom je odsječku crvenom bojom naznačeno područje proračuna.



Slika 3. Odsječak segmenta spremnika latentne topline

Za nestacionarni dvodimenzijski problem pripadajuće parcijalne diferencijalne jednačbe strujanja i prijelaza topline kojima je opisan matematički model izmjene topline unutar promatranog odsječka prikazanog na slici 3, te uz pretpostavke navedene u poglavlju 3.1, imaju sljedeći oblik

- **fluid**

- jednačba očuvanja mase (jednačba kontinuiteta)

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \cdot w_r)}{\partial r} = 0 \quad (3.8)$$

- jednačbe očuvanja količine gibanja (Navier – Stokesove jednačbe)

$$\frac{\partial w_x}{\partial t} + w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_r \cdot \frac{\partial w_x}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_f \cdot \left[ \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial w_x}{\partial r} \right) \right] \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial t} + w_x \cdot \frac{\partial w_r}{\partial x} + w_r \cdot \frac{\partial w_r}{\partial r} = -\frac{1}{\rho_f} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \nu_f \cdot \left[ \frac{\partial^2 w_r}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial w_r}{\partial r} \right) - \frac{w_r}{r^2} \right] \quad (3.10)$$

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_f \cdot c_f \cdot \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f \cdot c_f \cdot w_x \cdot \frac{\partial T_f}{\partial x} + \rho_f \cdot c_f \cdot w_r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} = \lambda_f \cdot \left[ \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) \right] \quad (3.11)$$

- **stijenka**

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_w \cdot c_w \cdot \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \cdot \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} \right] \quad (3.12)$$

- **akumulator topline**

- jednačba očuvanja energije

$$\rho_p \cdot c_p \cdot \frac{\partial H_p}{\partial t} = \lambda_p \cdot \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \cdot \frac{\partial H_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 H_p}{\partial x^2} \right] \quad (3.13)$$

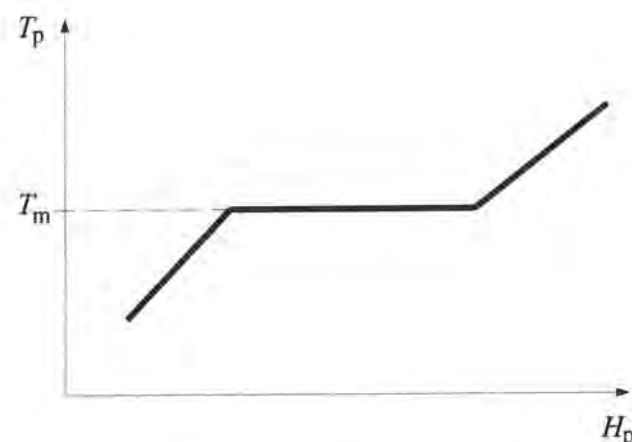
gdje je  $H_p$  volumna entalpija povezana s temperaturom jednačbom  $T_p = A \cdot H_p + B$  pri čemu vrijedi

$$A = \frac{1}{\rho_s \cdot c_s}, \quad B = 0 \quad \text{za} \quad H_p < \rho_s \cdot c_s \cdot T_m$$

$$A = 0, \quad B = T_m \quad \text{za} \quad \rho_s \cdot c_s \cdot T_m \leq H_p \leq \rho_s \cdot c_s \cdot T_m + \rho_L \cdot q$$

$$A = \frac{1}{\rho_L \cdot c_L}, \quad B = T_m \cdot \left( 1 - \frac{\rho_s \cdot c_s}{\rho_L \cdot c_L} \right) - \frac{q}{c_L} \quad \text{za} \quad H_p > \rho_s \cdot c_s \cdot T_m + \rho_L \cdot q$$

Ovisnost volumne entalpije i temperature akumulatora topline prikazana je na slici 4.



Slika 4. Temperatura akumulatora topline u ovisnosti o volumnoj entalpiji

Početni i rubni uvjeti su sljedeći:

- Početni uvjet:  $t = 0$

- početna raspodjela temperatura fluida, stijenke i akumulatora topline unutar spremnika je jednolika, a početna raspodjela brzina fluida jednaka je nuli tj. fluid je početno u stanju mirovanja

$$\begin{aligned} 0 < r \leq r_i, \quad 0 \leq x \leq L &\Rightarrow w_x = w_r = 0 \\ 0 < r < r_o, \quad 0 \leq x \leq L &\Rightarrow T_f = T_w = T_p = T_{\text{init}} \end{aligned} \quad (3.14)$$

- Rubni uvjeti:  $t > 0$

Ulaz:  $x = 0$

- fluid ulazi u spremnik topline s konstantnom brzinom pri konstantnoj temperaturi
- nema toplinskih gubitaka kroz ulaznu površinu spremnika

$$\begin{aligned} 0 < r < r_i &\Rightarrow w_x = w_m, \quad w_r = 0, \quad T_f = T_{\text{in}} \\ r_i \leq r \leq r_w &\Rightarrow \frac{\partial T_w}{\partial x} = 0 \\ r_w < r < r_o &\Rightarrow \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

Izlaz:  $x = L$

- nema toplinskih gubitaka kroz izlaznu površinu spremnika

- promjene brzina u smjeru normale na izlaznu plohu jednake su nuli tj. tok fluida je na izlazu potpuno razvijen

$$\begin{aligned} 0 < r < r_i &\Rightarrow \frac{\partial w_x}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial w_r}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0 \\ r_i \leq r \leq r_w &\Rightarrow \frac{\partial T_w}{\partial x} = 0 \\ r_w < r < r_o &\Rightarrow \frac{\partial T_p}{\partial x} = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Os simetrije:  $r = 0$

- brzine fluida u smjeru normale na os simetrije jednake su nuli
- promjene brzina i temperatura fluida u smjeru normale na os simetrije jednake su nuli

$$0 < x < L \Rightarrow w_r = 0, \quad \frac{\partial w_x}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T_f}{\partial r} = 0 \quad (3.17)$$

Granična površina fluid – stijenka:  $r = r_i$

- brzine fluida na površini stijenke jednake su nuli
- toplina se u tankom sloju uz površinu stijenke izmjenjuje samo provođenjem

$$0 < x < L \Rightarrow w_x = w_r = 0, \quad \lambda_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial r} \right)_{r=r_i} = \lambda_w \left( \frac{\partial T_w}{\partial r} \right)_{r=r_i} \quad (3.18)$$

Granična površina stijenka – akumulator topline:  $r = r_w$

- izmjena topline između stijenke i akumulatora topline u tankom sloju uz površinu stijenke vrši se samo provođenjem

$$0 < x < L \Rightarrow \lambda_w \left( \frac{\partial T_w}{\partial r} \right)_{r=r_w} = \lambda_p \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)_{r=r_w} \quad (3.19)$$

Vanjski plašt spremnika:  $r = r_o$

- nema prijenosa topline kroz vanjsku stijenkiju spremnika

$$0 < x < L \Rightarrow \frac{\partial T_p}{\partial r} = 0 \quad (3.20)$$

Ovim su diferencijalnim jednadžbama s pripadnim početnim i rubnim uvjetima opisane toplinske pojave unutar spremnika latentne topline te njihovim rješavanjem slijede nepoznate raspodjele brzina, tlakova i temperatura fluida, raspodjele temperatura stijenke cijevi te raspodjele entalpija i temperatura akumulatora topline.

Izmijenjena toplina prisilnom konvekcijom između fluida i stijenke definira se primjenom koeficijenta prijelaza topline te vrijedi

$$Q = \alpha \cdot (T_f - T_w) \cdot t \cdot A \quad (3.21)$$

gdje je  $T_f$  prosječna temperatura fluida ili temperatura fluida na većoj udaljenosti od stijenke, a  $T_w$  temperatura površine stijenke.

U tankom graničnom sloju u blizini stijenke toplina se u smjeru normale izmjenjuje samo provođenjem pa vrijedi

$$d\Phi = \alpha \cdot (T_f - T_w) \cdot dA = -\lambda_r \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \cdot dA \quad (3.22)$$

Iz jednadžbe (3.22) slijedi izraz za određivanje koeficijenta prijelaza topline u obliku

$$\alpha = -\lambda_r \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \cdot \frac{1}{T_f - T_w} \quad \text{odnosno} \quad \alpha = -\lambda_r \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_w \cdot \frac{1}{T_f - T_w} \quad (3.23)$$

te je poznavanjem temperaturnih raspodjela fluida i stijenke moguće odrediti lokalne vrijednosti koeficijenta prijelaza topline.

### 3.4 Bezdimenzijski oblik diferencijalnih jednadžbi

Parcijalne diferencijalne jednadžbe koje predstavljaju matematički model složenog fenomena prijelaza topline unutar spremnika latentne topline mogu se prevesti u bezdimenzijski oblik uvođenjem bezdimenzijskih varijabli definiranih na sljedeći način

➤ bezdimenzijske koordinate

$$R = \frac{r}{D_i} \quad \text{i} \quad X = \frac{x}{D_i} \quad (3.24)$$

➤ bezdimenzijske brzine

$$W_x = \frac{w_x}{w_{in}} \quad \text{i} \quad W_r = \frac{w_r}{w_{in}} \quad (3.25)$$

➤ bezdimenzijski tlak

$$P = \frac{p - p_0}{\rho_f \cdot w_{in}^2} \quad (3.26)$$

➤ bezdimenzijsko vrijeme

$$\tau = \frac{w_{in}}{D_i} \cdot t \quad (3.27)$$

➤ bezdimenzijska temperatura (nadtemperatura)

$$\Theta = \frac{T - T_m}{T_{in} - T_m} \quad (3.28)$$

➤ bezdimenzijska entalpija

$$\chi = \frac{H - \rho_s \cdot c_s \cdot T_m}{\rho_L \cdot q} \quad (3.29)$$

➤ bezdimenzijske značajke

$$\text{Reynoldsova značajka} \quad \text{Re} = \frac{w_{in} \cdot D_i}{\nu_f} \quad (3.30)$$

$$\text{Prandtlova značajka} \quad \text{Pr} = \frac{\nu_f}{a_f} \quad (3.31)$$

$$\text{Stefanova značajka} \quad \text{St} = \frac{c_L \cdot (T_{in} - T_m)}{q} \quad \text{za vrijeme taljenja} \quad (3.32)$$

$$\text{St} = \frac{c_s \cdot (T_m - T_{in})}{q} \quad \text{za vrijeme skrućivanja} \quad (3.33)$$

$$\text{Nusseltova značajka} \quad \text{Nu} = \frac{\alpha \cdot D_i}{\lambda_r} \quad (3.34)$$

Uvođenjem bezdimenzijskih koordinata (3.24) i bezdimenzijskih brzina (3.25) u jednadžbu očuvanja mase fluida (3.8) jednadžba očuvanja mase slijedi u bezdimenzijskom obliku

$$\frac{\partial W_x}{\partial X} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial (R \cdot W_r)}{\partial R} = 0 \quad (3.35)$$

Uvrštavanjem bezdimenzijskih koordinata (3.24), bezdimenzijskih brzina (3.25), bezdimenzijskog tlaka (3.26), bezdimenzijskog vremena (3.27) te Reynoldsove značajke (3.30) u jednadžbe očuvanja količine gibanja fluida (3.9) i (3.10) ove se jednadžbe dobivaju u bezdimenzijskom obliku

$$\frac{\partial W_x}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial W_x}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_x}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_x}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_x}{\partial R} \right) \right] \quad (3.36) \text{ i}$$

$$\frac{\partial W_R}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial W_R}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_R}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} \right) - \frac{W_R}{R^2} \right] \quad (3.37).$$

Jednadžba očuvanja energije fluida u bezdimenzijskom obliku slijedi uvrštavanjem bezdimenzijskih koordinata (3.24), bezdimenzijskih brzina (3.25), bezdimenzijskog vremena (3.27), bezdimenzijske temperature (3.28) te Reynoldsove i Prandtlove značajke (3.30) i (3.31) u jednadžbu očuvanja energije fluida (3.11) pa slijedi

$$\frac{\partial \Theta_f}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \Theta_f}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} \right) \right] \quad (3.38).$$

Bezdimenzijska diferencijalna jednadžba koja definira izmjenu topline provođenjem kroz stijenku cijevi slijedi uvrštavanjem bezdimenzijskih koordinata (3.24), bezdimenzijskog vremena (3.27), bezdimenzijske temperature (3.28) te Reynoldsove i Prandtlove značajke (3.30) i (3.31) u Fourierovu diferencijalnu jednadžbu provođenja topline (3.12) i ima sljedeći oblik

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} \right] \quad (3.39).$$

Entalpijska jednadžba akumulatora topline (3.13) uvrštavanjem bezdimenzijskih koordinata (3.24), bezdimenzijskog vremena (3.27), bezdimenzijske temperature (3.28), bezdimenzijske entalpije (3.29), Reynoldsove i Prandtlove značajke (3.30) i (3.31) te Stefanove značajke (3.32) i (3.33) prevodi se u bezdimenzijski oblik

$$\frac{\partial \chi_p}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \chi_p}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \chi_p}{\partial X^2} \right] \quad (3.40).$$

Bezdimenzijska entalpija  $\chi_p$  povezana je s bezdimenzijskom temperaturom jednadžbom  $\Theta_p = A_b \cdot \chi_p + B_b$  pri čemu vrijedi

$$A_b = \frac{1}{\text{St}} \cdot \frac{\rho_L \cdot c_L}{\rho_s \cdot c_s}, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad \chi_p < 0$$

$$A_b = 0, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad 0 \leq \chi_p \leq 1$$

$$A_b = \frac{1}{\text{St}}, \quad B_b = -\frac{1}{\text{St}} \quad \text{za} \quad \chi_p > 1.$$

Prema tome matematički model spremnika latentne topline u bezdimenzijskom obliku čine sljedeće bezdimenzijske diferencijalne jednadžbe kojima je opisano strujanje i izmjena topline unutar latentnog spremnika:

- **fluid**

- jednadžba očuvanja mase

$$\frac{\partial W_x}{\partial X} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial (R \cdot W_R)}{\partial R} = 0 \quad (3.41)$$

- jednadžbe očuvanja količine gibanja

$$\frac{\partial W_x}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial W_x}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_x}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_x}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_x}{\partial R} \right) \right] \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial W_R}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial W_R}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_R}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} \right) - \frac{W_R}{R^2} \right] \quad (3.43)$$

- jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial \Theta_f}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \Theta_f}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} \right) \right] \quad (3.44)$$

- **stijenka**

- jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} \right] \quad (3.45)$$

- **akumulator topline**

- jednadžba očuvanja energije

$$\frac{\partial \chi_p}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \chi_p}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \chi_p}{\partial X^2} \right] \quad (3.46)$$

uz

$\Theta_p = A_b \cdot \chi_p + B_b$  pri čemu vrijedi

$$A_b = \frac{1}{\text{St}} \cdot \frac{\rho_l \cdot c_l}{\rho_s \cdot c_s}, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad \chi_p < 0$$

$$A_b = 0, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad 0 \leq \chi_p \leq 1$$

$$A_b = \frac{1}{\text{St}}, \quad B_b = -\frac{1}{\text{St}} \quad \text{za} \quad \chi_p > 1.$$

Početni i rubni uvjeti u bezdimenzijskom obliku su sljedeći:

- Početni uvjet:  $\tau = 0$

$$0 < R \leq 0,5, \quad 0 \leq X \leq L/D_i \Rightarrow W_X = W_R = 0 \quad (3.47)$$

$$0 < R < R_o, \quad 0 \leq X \leq L/D_i \Rightarrow \Theta_f = \Theta_w = \Theta_p = \Theta_{\text{mit}}$$

- Rubni uvjeti:  $\tau > 0$

Ulaz:  $X = 0$

$$0 < R < 0,5 \Rightarrow W_X = 1, \quad W_R = 0, \quad \Theta_f = 1$$

$$0,5 \leq R \leq R_w \Rightarrow \frac{\partial \Theta_w}{\partial X} = 0 \quad (3.48)$$

$$R_w < R < R_o \Rightarrow \frac{\partial \Theta_p}{\partial X} = 0$$

Izlaz:  $X = L/D_i$

$$0 < R < 0,5 \Rightarrow \frac{\partial W_X}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial W_R}{\partial X} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_f}{\partial X} = 0$$

$$0,5 \leq R \leq R_w \Rightarrow \frac{\partial \Theta_w}{\partial X} = 0 \quad (3.49)$$

$$R_w < R < R_o \Rightarrow \frac{\partial \Theta_p}{\partial X} = 0$$

Osimetrije:  $R = 0$

$$0 < X < L/D_i \Rightarrow W_R = 0, \quad \frac{\partial W_X}{\partial R} = 0, \quad \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} = 0 \quad (3.50)$$

Granična površina fluid – stijenka:  $R = 0,5$

$$0 < X < L/D_i \Rightarrow W_X = W_R = 0, \quad \left( \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} \right)_{R=0,5} = \frac{\lambda_w}{\lambda_f} \cdot \left( \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right)_{R=0,5} \quad (3.51)$$

Granična površina stijenka – akumulator topline:  $R = R_w$

$$0 < X < L/D_i \Rightarrow \left( \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right)_{R=R_w} = \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \left( \frac{\partial \Theta_p}{\partial R} \right)_{R=R_w} \quad (3.52)$$

Vanjska stijenka:  $R = R_o$

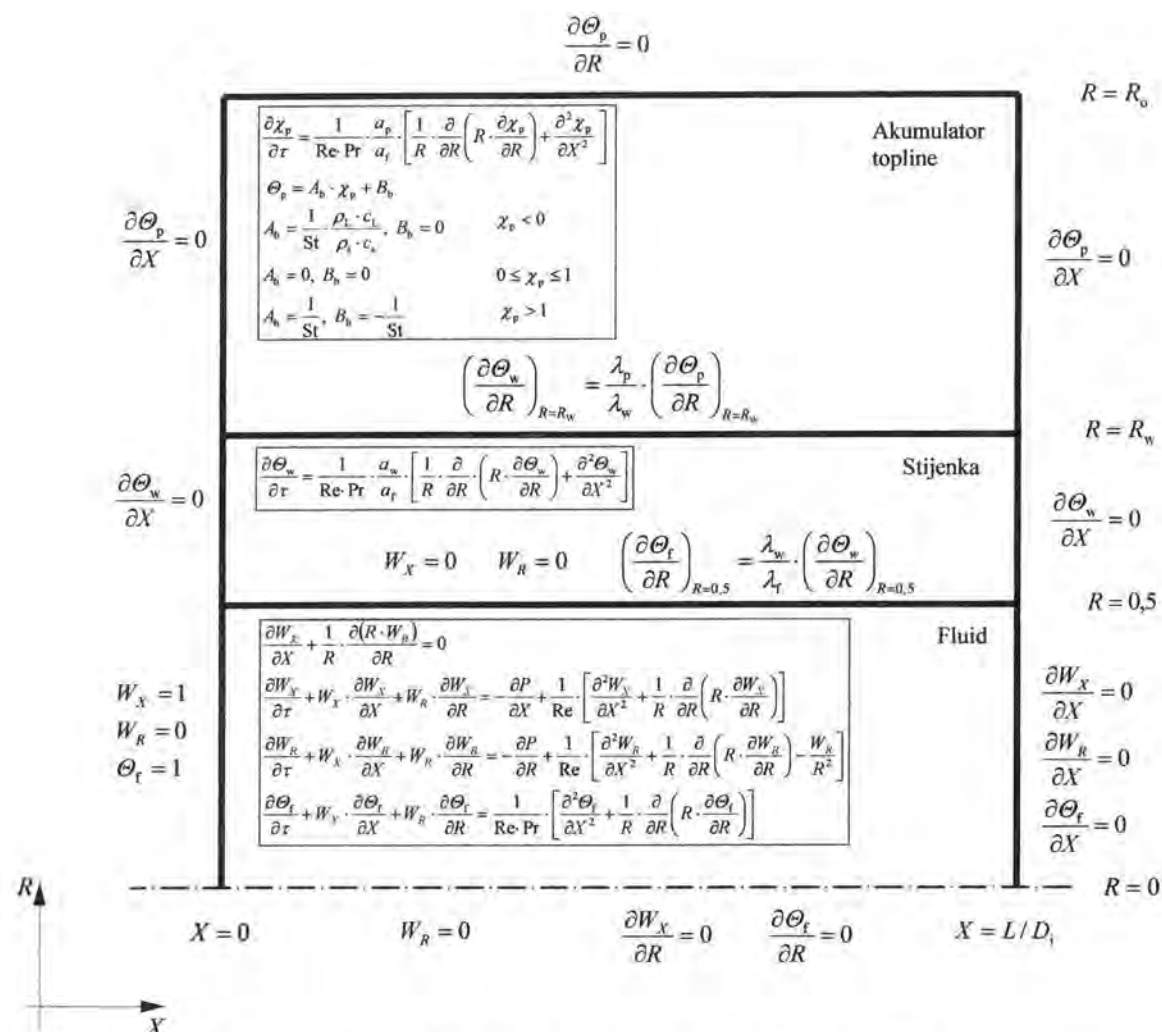
$$0 < X < L/D_i \Rightarrow \frac{\partial \Theta_p}{\partial R} = 0 \quad (3.53)$$

Na temelju prethodnih jednadžbi slijedi da je temperaturno polje unutar spremnika latentne topline funkcija sljedećih veličina

$$\Theta = \Theta \left( \tau, R, X, \text{Re}, \text{Pr}, \text{St}, \frac{a_w}{a_f}, \frac{a_s}{a_f}, \frac{a_l}{a_f}, \frac{\rho_s \cdot c_s}{\rho_l \cdot c_l}, \frac{\lambda_f}{\lambda_w}, \frac{\lambda_s}{\lambda_f}, \frac{\lambda_l}{\lambda_f}, \frac{r_w}{D_i}, \frac{r_o}{D_i}, \frac{L}{D_i} \right) \quad (3.54)$$

Matematički model spremnika latentne topline tj. područje proračuna s diferencijalnim jednadžbama kojima je opisana nestacionarna izmjena topline između fluida, stijenke i akumulatora topline te pripadnim rubnim uvjetima prikazan je na slici 5.





Slika 5. Područje proračuna s pripadajućim diferencijalnim jednadžbama i rubnim uvjetima

Prijelaz topline prisilnom konvekcijom u bezdimenzijskom se obliku izražava funkcijom  $Nu = f(\text{Re}, \text{Pr})$ . Bezdimenzijske su značajke  $\text{Re}$  i  $\text{Pr}$  sadržane u diferencijalnim jednadžbama strujanja i prijelaza topline fluida. Rješavanjem ovih jednadžbi uz definirane početne i rubne uvjete dobiva se polje strujanja i raspodjela temperatura, a iz rubnog uvjeta u blizini stijenke određuje se Nusseltova značajka čija se lokalna vrijednost dobiva uvrštavanjem bezdimenzijske koordinate (3.24), bezdimenzijske temperature (3.28) i izraza za Nusseltovu značajku (3.34) u jednadžbu (3.23) pa slijedi

$$Nu = - \left( \frac{\partial \theta}{\partial R} \right)_w \quad (3.55)$$

## 4 Numeričko rješenje postavljenog matematičkog modela

### 4.1 Diferencijalni i integralni oblik opće jednadžbe očuvanja

Promatranjem diferencijalnih jednadžbi strujanja i prijelaza topline kojima je opisana izmjena topline unutar spremnika latentne topline uočavaju se njihove sličnosti. Uvođenjem opće varijable  $\Psi$  jednadžba očuvanja mase, jednadžbe očuvanja količine gibanja i jednadžba očuvanja energije mogu se napisati u sljedećem obliku

$$\frac{\partial(\rho \cdot \Psi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) + S_\Psi \quad (4.1)$$

gdje je

$\frac{\partial(\rho \cdot \Psi)}{\partial t}$	nestacionarni član (akumulacija),
$\text{div}(\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w})$	konvektivni član,
$\text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi)$	difuzijski član i
$S_\Psi$	izvorni član.

tj. riječima

vremenska promjena varijable $\Psi$ elementa + fluida	+ protok varijable $\Psi$ kroz element fluida	=	promjena varijable $\Psi$ uslijed difuzije	+ promjena varijable $\Psi$ zbog izvora.
---	---	---	--	--

Ova se jednadžba naziva općom jednadžbom očuvanja varijable  $\Psi$ . Opća se jednadžba očuvanja koristi kao polazište u procedurama proračuna kod metode kontrolnih volumena. Uvrštavanjem vrijednosti 1,  $w_x$ ,  $w_r$ ,  $T$  ili  $H$  umjesto varijable  $\Psi$  te odabirom odgovarajućih vrijednosti koeficijenta difuzije  $\Gamma$  i izvornog člana, iz opće jednadžbe očuvanja dobivaju se jednadžba očuvanja mase, jednadžbe očuvanja količine gibanja i jednadžba očuvanja energije tj. diferencijalne jednadžbe strujanja i prijelaza topline.

Za primjenu metode kontrolnih volumena, koja će biti opisana u nastavku, ovu je jednadžbu potrebno integrirati po kontrolnom volumenu na sljedeći način

$$\int_{CV} \frac{\partial(\rho \cdot \Psi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \text{div}(\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) dV = \int_{CV} \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) dV + \int_{CV} S_\Psi dV \quad (4.2)$$

Integrali konvektivnog i difuzijskog člana mogu se primjenom Gaussova teorema prikazati kao integrali duž površine ruba kontrolnog volumena na sljedeći način

$$\int_{CV} \text{div } \vec{a} \cdot dV = \int_A (\vec{n} \cdot \vec{a}) \cdot dA \quad (4.3)$$

Fizikalno  $\vec{n} \cdot \vec{a}$  predstavlja komponentu vektora  $\vec{a}$  u smjeru normale na površinu  $dA$ . Na taj je način integral divergencija vektora  $\vec{a}$  duž kontrolnog volumena jednak komponenti vektora  $\vec{a}$  u smjeru normale na površinu koja ograničava kontrolni volumen i to integrirano duž cijele površine ruba.

Primjenom Gaussova teorema slijedi

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} \rho \cdot \Psi \cdot dV \right) + \int_A \vec{n} \cdot (\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) dA = \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad } \Psi) dA + \int_{CV} S_\Psi dV \quad (4.4)$$

gdje je

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} \rho \cdot \Psi \cdot dV \right) \quad \text{vremenska promjena svojstva fluida } \Psi \text{ unutar kontrolnog volumena,}$$

$$\int_A \vec{n} \cdot (\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) dA \quad \text{iznos promjene svojstva fluida } \Psi \text{ zbog konvekcije kroz granice,}$$

$$\int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad } \Psi) dA \quad \text{iznos promjene svojstva fluida } \Psi \text{ uslijed difuzije kroz granice i}$$

$$\int_{CV} S_\Psi dV \quad \text{iznos stvaranja svojstva fluida } \Psi.$$

U nestacionarnim (vremenski ovisnim) problemima opću je jednadžbu očuvanja osim po kontrolnom volumenu potrebno integrirati i po vremenu odnosno po malom vremenskom intervalu  $\Delta t$  pa slijedi

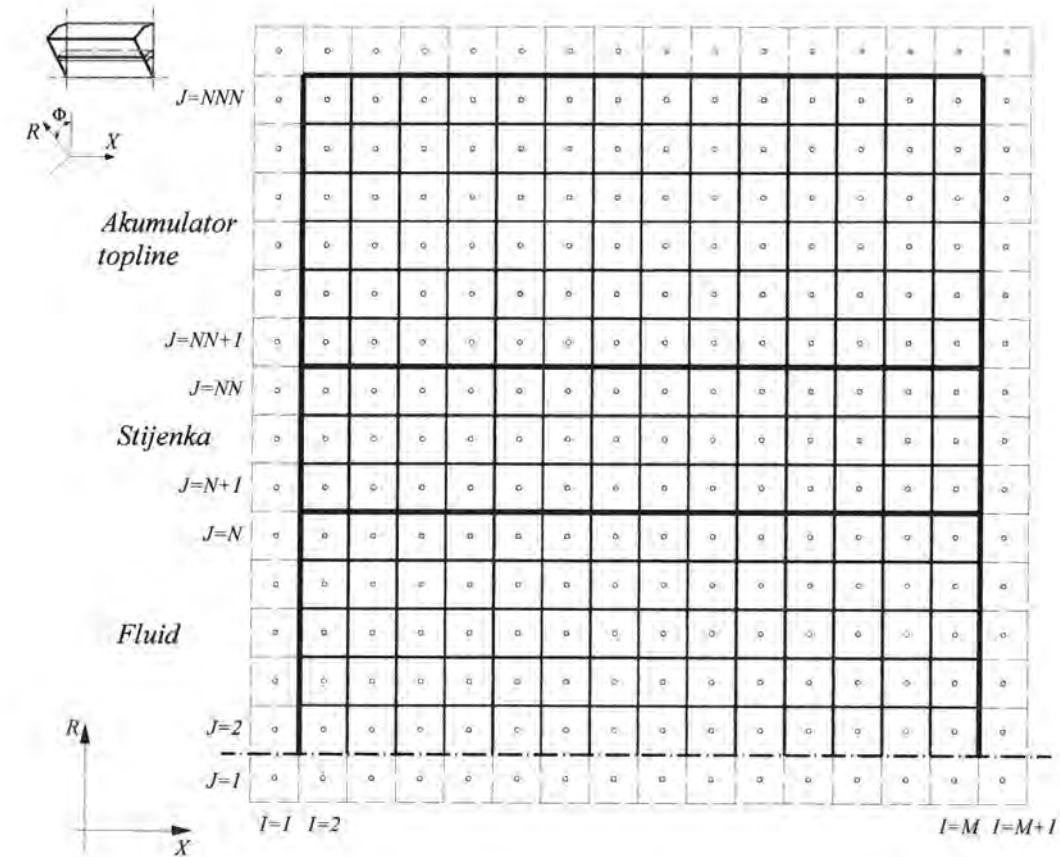
$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left( \int_{CV} (\rho \cdot \Psi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} \cdot (\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) dA \cdot dt = \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad } \Psi) dA \cdot dt + \int_{\Delta t} \int_{CV} S_\Psi dV \cdot dt \quad (4.5).$$

Ova jednadžba predstavlja integralni oblik opće jednadžbe očuvanja i osnova je za primjenu numeričke metode kontrolnih volumena pri proračunu nestacionarnih problema strujanja i prijelaza topline.

## 4.2 Metoda kontrolnih volumena za proračun nestacionarnih problema strujanja i prijelaza topline

### 4.2.1 Formulacija kontrolnog volumena

Matematički model nekog fizikalnog problema definiran je pomoću diferencijalnih jednadžbi te početnih i rubnih uvjeta. Primjenom numeričkih metoda diferencijalne jednadžbe + početni i rubni uvjeti (tj. matematički model) transformiraju se u sustave algebarskih jednadžbi tj. unutrašnjost područja proračuna zamjenjuje se mrežom te se približno rješenje diferencijalne jednadžbe računa u čvorovima mreže. Točnost rješenja ovisi o gustoći mreže kojom je diskretizirana domena odnosno o broju čvorova u kojima tražimo rješenje. Kod metode kontrolnih volumena područje proračuna odnosno domena podijeljeno je na određeni broj kontrolnih volumena koji se međusobno ne prekrivaju, tako da jedan kontrolni volumen okružuje svaki čvor mreže. Diferencijalna jednadžba se integrira po svakom od kontrolnih volumena. Interpolacije koje predstavljaju varijaciju vrijednosti  $\Psi$  među čvorovima mreže koriste se za određivanje potrebnih integrala. Rezultat je jednadžba diskretizacije koja sadrži vrijednosti od  $\Psi$  za grupu čvorova mreže. Jednadžba diskretizacije dobivena na taj način izražava principe očuvanja za  $\Psi$  za konačni kontrolni volumen, upravo kako to diferencijalna jednadžba očuvanja čini za beskonačno mali kontrolni volumen.



Slika 6. Mreža kontrolnih volumena elementarnog isječka spremnika latentne topline

#### 4.2.2 Jednadžbe diskretizacije za proračun nestacionarnog dvodimenzijskog polja strujanja fluida u cilindričnom koordinatnom sustavu

Zakon očuvanja varijable  $\Psi$  za slučaj nestacionarnog toka ima opći oblik

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \Psi) + \text{div}(\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) + S_{\Psi} \quad (4.6)$$

odnosno u integralnom obliku

$$\int_{CV} \left( \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \Psi) dt \right) dV + \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\rho \cdot \Psi \cdot \vec{w}) dA \right) dt = \int_t^{t+\Delta t} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) dA \right) dt + \int_{t, CV} S_{\Psi} dV \cdot dt \quad (4.7)$$

Uvođenjem prethodno definiranih bezdimenzijskih veličina ovaj zakon očuvanja moguće je napisati u bezdimenzijskom obliku

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} + \text{div}(\Psi \cdot \vec{W}) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) + S_{\Psi} \quad (4.8)$$

odnosno

$$\int_{CV} \left( \int_{\tau}^{\tau+\Delta \tau} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau} d\tau \right) dV + \int_{\tau}^{\tau+\Delta \tau} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Psi \cdot \vec{W}) dA \right) d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta \tau} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) dA \right) d\tau + \int_{\tau, CV} S_{\Psi} dV \cdot d\tau \quad (4.9)$$

Konvekcija skalarne varijable  $\Psi$  ovisi o veličini i smjeru polja lokalnih brzina. U općenitom slučaju ovo je polje strujanja odnosno polje brzina nepoznato te ga je zajedno s ostalim varijablama strujanja i prijelaza topline potrebno odrediti.

Glavne diferencijalne jednadžbe kojima je definirano polje strujanja proizlaze iz opće jednadžbe očuvanja uvrštavanjem umjesto varijable  $\Psi$  vrijednosti komponenti bezdimenzijskih brzina  $W_X$  odnosno  $W_R$  te umjesto koeficijenta difuzije  $\Gamma$  bezdimenzijske veličine  $\frac{1}{\text{Re}}$ . Polje brzina mora zadovoljiti i jednadžbu očuvanja mase koju dobivamo uvrštavanjem vrijednosti 1 umjesto varijable  $\Psi$  u opću jednadžbu očuvanja, pa slijedi

- jednadžba očuvanja količine gibanja u smjeru osi  $X$

$$\frac{\partial W_X}{\partial \tau} + W_X \cdot \frac{\partial W_X}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_X}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_X}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_X}{\partial R} \right) \right] \quad (4.10)$$

- jednadžba očuvanja količine gibanja u smjeru  $R$

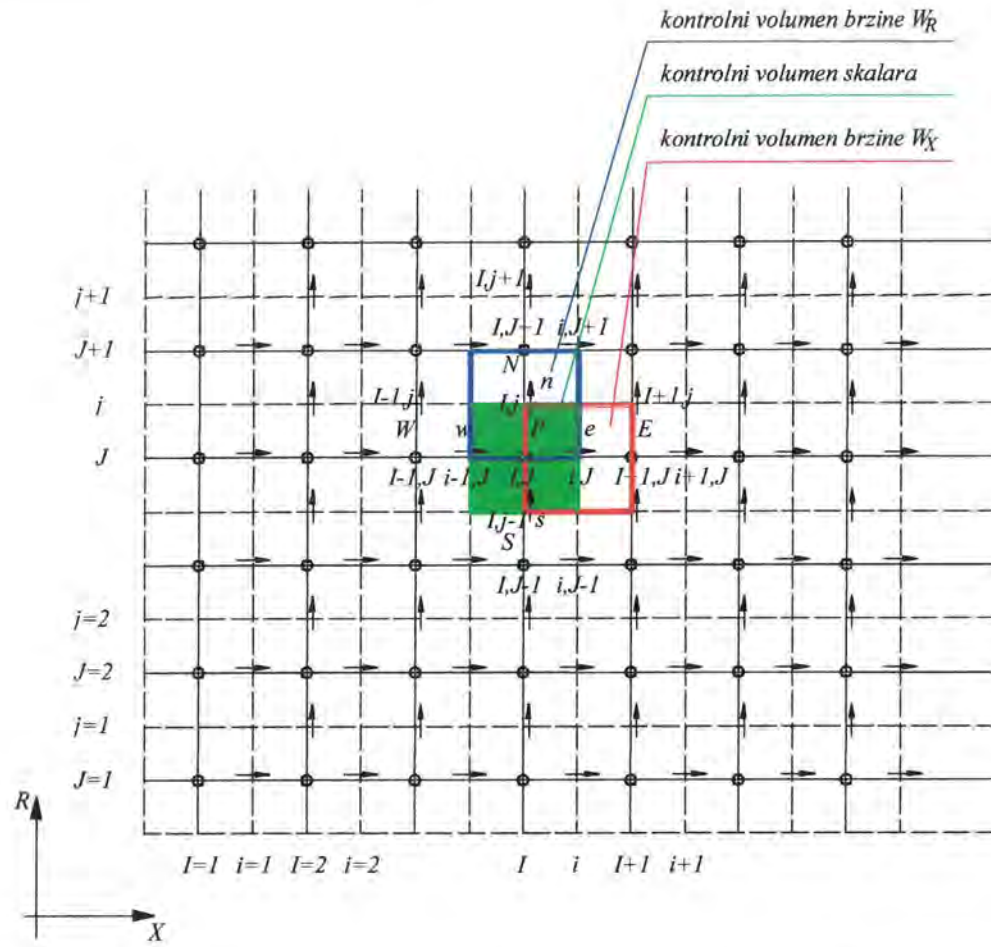
$$\frac{\partial W_R}{\partial \tau} + W_X \cdot \frac{\partial W_R}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} = -\frac{\partial P}{\partial R} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 W_R}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial W_R}{\partial R} \right) - \frac{W_R}{R^2} \right] \quad (4.11)$$

- jednadžba očuvanja mase za nestišljivi fluid

$$\frac{\partial W_X}{\partial X} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial (R \cdot W_R)}{\partial R} = 0 \quad (4.12)$$

Ove su tri jednadžbe međusobno povezane jer se obje komponente brzina pojavljuju i u jednadžbama očuvanja količine gibanja i u jednadžbi očuvanja mase. Kao izvorni član u jednadžbama očuvanja količine gibanja javlja se gradijent tlaka koji je pri proračunu polja strujanja također uglavnom nepoznat te je pri proračunu polja strujanja, uz proračun polja brzina, potrebno izračunati i polje tlakova. Kod nestišljivih fluida gustoća je konstantna te nije ovisna o tlaku. U ovom slučaju veza između tlaka i brzina predstavlja uvjet (ograničenje) za rješenje polja strujanja tj. ukoliko je primijenjeno točno polje tlakova u jednadžbama očuvanja količine gibanja rezultirajuće polje brzina mora zadovoljiti jednadžbu očuvanja mase.

Za rješavanje postavljenih diferencijalnih jednadžbi primjenom metode kontrolnih volumena potrebno je najprije izvršiti diskretizaciju područja proračuna. Ukoliko se ista mreža koristi za definiranje čvorova skalara kao što su tlak i temperatura te čvorova brzina, utjecaj tlaka nije pravilno tretiran u diskretiziranim jednadžbama očuvanja količine gibanja tj. budući da jednadžba očuvanja količine gibanja u tom slučaju sadrži razliku tlakova između dva naizmjenična, a ne susjedna, čvora to može dovesti do nerealnog polja tlakova. Rješenje je ovog problema upotreba pomaknute mreže za proračun polja komponenti brzina, koje onda računamo za mrežu koja se ne poklapa s mrežom koja se koristi za sve ostale varijable, pa time nestaju prethodno spomenute poteškoće. Pomaknuta se mreža odabire tako da se komponente brzine računaju na stranicama kontrolnih volumena, a time se sprečava pojava valovitog polja brzina i valovitog polja tlakova. Razmještaj mreža za model diskretizacije u dvije dimenzije prostora prikazan je na slici 7.



Slika 7. Razmještaj mreža kontrolnih volumena za proračun polja strujanja i temperaturnog polja

Skalarne varijable, uključujući i tlak, računaju se u čvorovima označenim točkom (o). Čvorovi za proračun brzina označeni su strelicama. Horizontalne strelice (→) označavaju čvorove za proračun brzina  $W_x$ , a vertikalne strelice (↑) čvorove za proračun brzina  $W_R$ . Čvorovi skalarnih varijabli označeni su velikim slovima  $I$  i  $J$ , čvorovi brzine  $W_x$  malim slovom  $i$  i velikim slovom  $J$ , a čvorovi brzine  $W_R$  velikim slovom  $I$  i malim slovom  $j$ . Prednost je pomaknute mreže i u činjenici da se brzine promatraju upravo na mjestima gdje su potrebne u konveksijsko-difuzijskim proračunima.

Jednadžba diskretizacije diferencijalne jednadžbe očuvanja količine gibanja za brzinu  $W_x$  u čvoru  $(i, J)$  ima sljedeći oblik

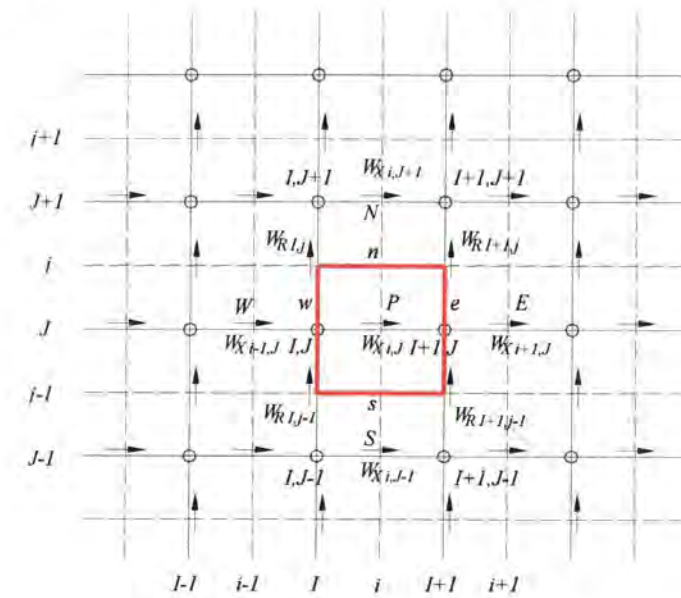
$$a_{i,J} \cdot W_{x,i,J} = \sum a_{nb} \cdot W_{x,nb} - \frac{P_{i+1,J} - P_{i,J}}{\delta x_{W_x}} \cdot \Delta V_{W_x} + \bar{S} \cdot \Delta V_{W_x} \quad (4.13)$$

odnosno

$$a_{i,J} \cdot W_{x,i,J} = \sum a_{nb} \cdot W_{x,nb} + (P_{i,J} - P_{i+1,J}) \cdot A_{i,J} + b_{i,J} \quad (4.14)$$

gdje je  $\Delta V_{W_x}$  volumen promatranog kontrolnog volumena,  $b_{i,J} = \bar{S} \cdot \Delta V_{W_x}$  izvorni član, a  $A_{i,J}$  površina stranice kontrolnog volumena. Gradijent tlaka diskretiziran je linearnom interpolacijom tlakova u čvorovima na granicama promatranog kontrolnog volumena.

S  $a_{nb}$  odnosno  $W_{x,nb}$  označeni su koeficijenti odnosno brzine  $W_x$  u susjednim čvorovima  $(i-1, J)$ ,  $(i+1, J)$ ,  $(i, J-1)$  i  $(i, J+1)$ . Koeficijenti  $a_{i,J}$ ,  $a_{i+1,J}$ ,  $a_{i,J-1}$  i  $a_{i,J+1}$  mogu se računati primjenom različitih shema pogodnih za rješavanje konveksijsko-difuzijskih problema, kao što su shema centralnih razlika, upwind shema, eksponencijalna shema, hibridna shema, potencijalna shema ili neke od shema višeg reda kao što je kvadratna upwind (*Quick*) shema [46]. U ovom je radu za proračun koeficijenata  $a$  korištena potencijalna shema jer je dokazano da je vrlo pogodna za praktične proračune strujanja, a često je korištena i u komercijalnim kompjuterskim programima za proračun polja strujanja. Spomenuti koeficijenti označeni s  $a$  odnose se na kombinirani utjecaj konvekcije i difuzije na stranicama kontrolnog volumena, a dobivaju se kombiniranjem konvektivnog fluksa po jedinici mase  $F$  i difuzijske vodljivosti  $D$  na stranicama kontrolnog volumena, koji se računaju prema sljedećim izrazima.

Slika 8. Kontrolni volumen brzine  $W_x$  s pripadnim susjednim brzinama

Granice kontrolnog volumena označene su s  $e$ ,  $w$ ,  $n$  i  $s$  pa slijedi

$$F_e = (W_x \cdot A)_e = \frac{F_{i+1,J} + F_{i,J}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{x,i+1,J} + W_{x,i,J}) \cdot \Delta R \quad (4.15)$$

$$F_w = (W_x \cdot A)_w = \frac{F_{i-1,J} + F_{i,J}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{x,i-1,J} + W_{x,i,J}) \cdot \Delta R \quad (4.16)$$

$$F_n = (W_R \cdot A)_n = \frac{F_{i,J} + F_{i+1,J}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{R,i,J} + W_{R,i+1,J}) \cdot \Delta X \quad (4.17)$$

$$F_s = (W_R \cdot A)_s = \frac{F_{I,J-1} + F_{I+1,J-1}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{R,I,J-1} + W_{R,I+1,J-1}) \cdot \Delta X \quad (4.18)$$

$$D_e = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{X_{I+1} - X_I} \cdot \Delta R \quad (4.19)$$

$$D_w = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{X_I - X_{I-1}} \cdot \Delta R \quad (4.20)$$

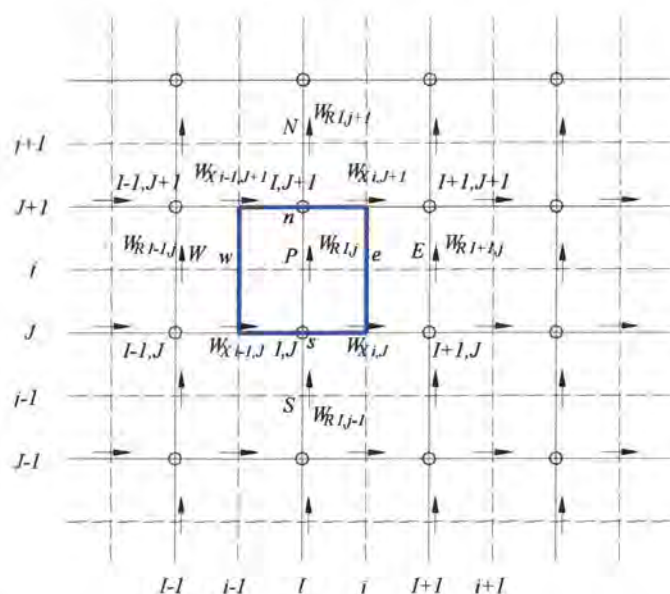
$$D_n = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{R_{J+1} - R_J} \cdot \Delta X \quad (4.21)$$

$$D_s = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{R_J - R_{J-1}} \cdot \Delta X \quad (4.22)$$

Za vrijeme svake iteracije komponente brzina  $W_X$  i  $W_R$  korištene u prethodnim izrazima su one dobivene kao vrijednosti brzina u prethodnoj iteraciji (ili vrijednosti uzete kao početna pretpostavka u prvoj iteraciji).

Analogno, jednačba diskretizacije diferencijalne jednačbe očuvanja količine gibanja za brzinu  $W_R$  u čvoru  $(I,j)$  ima oblik

$$a_{i,j} \cdot W_{R,I,j} = \sum a_{nb} \cdot W_{R,nb} + (P_{I,j} - P_{I,j+1}) \cdot A_{I,j} + b_{I,j} \quad (4.23)$$



Slika 9. Kontrolni volumen brzine  $W_R$  s pripadnim susjednim brzinama

Koeficijenti  $a_{i,j}$  i  $a_{nb}$  također sadrže kombinaciju konvektivnog fluksa po jedinici mase  $F$  i difuzijske vodljivosti  $D$  na stranicama kontrolnog volumena koji se računaju kao

$$F_e = (W_X \cdot A)_e = \frac{F_{I,j} + F_{I,j+1}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{X,I,j} + W_{X,I,j+1}) \cdot \Delta R \quad (4.24)$$

$$F_w = (W_X \cdot A)_w = \frac{F_{I-1,j} + F_{I,j}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{X,I-1,j} + W_{X,I,j}) \cdot \Delta R \quad (4.25)$$

$$F_n = (W_R \cdot A)_n = \frac{F_{I,j} + F_{I,j+1}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{R,I,j} + W_{R,I,j+1}) \cdot \Delta X \quad (4.26)$$

$$F_s = (W_R \cdot A)_s = \frac{F_{I,j-1} + F_{I,j}}{2} = \frac{1}{2} \cdot (W_{R,I,j-1} + W_{R,I,j}) \cdot \Delta X \quad (4.27)$$

$$D_e = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{X_{I+1} - X_I} \cdot \Delta R \quad (4.28)$$

$$D_w = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{X_I - X_{I-1}} \cdot \Delta R \quad (4.29)$$

$$D_n = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{R_{J+1} - R_J} \cdot \Delta X \quad (4.30)$$

$$D_s = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{R_J - R_{J-1}} \cdot \Delta X \quad (4.31)$$

Ukoliko je poznato polje tlaka diskretizirane jednačbe očuvanja količine gibanja (4.14) i (4.23) mogu se napisati za svaki kontrolni volumen, te se zatim sustavi algebarskih jednačbi mogu riješiti u svrhu dobivanja polja brzina. Ukoliko je polje tlaka točno rezultirajuće polje brzina zadovoljit će jednačbu očuvanja mase. Ukoliko je polje tlaka nepoznato potreban je algoritam za proračun polja tlaka. U ovom je radu u tu svrhu korišten algoritam SIMPLER koji predstavlja poboljšanu verziju algoritma SIMPLE kojega su 1972. godine opisali Patankar i Spalding [47]. Poboljšani algoritam SIMPLER, kojim se postiže brža konvergencija rješenja, opisao je Patankar 1980. godine [47], a sastoji se od sljedećih koraka.

Jednačbe diskretizacije diferencijalnih jednačbi očuvanja količine gibanja mogu se napisati u obliku

$$W_{X,I,j} = \frac{\sum a_{nb} \cdot W_{X,nb} + b_{I,j}}{a_{I,j}} + \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}} \cdot (P_{I,j} - P_{I+1,j}) \quad (4.32)$$

$$W_{R,I,j} = \frac{\sum a_{nb} \cdot W_{R,nb} + b_{I,j}}{a_{I,j}} + \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}} \cdot (P_{I,j} - P_{I,j+1}) \quad (4.33)$$

Njihovo se rješavanje vrši na sljedeći način. Starta se s pretpostavljenim poljem brzina  $W_X$  i  $W_R$ . Proračun koeficijenata  $a_{nb}$  u jednačbi očuvanja količine gibanja brzine  $W_X$  vrši se primjenom potencijalne sheme prema kojoj je

$$a_{i-1,j} = a_w = D_w \cdot \max[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_w|)^5] + \max[F_w, 0] \quad (4.34)$$

$$a_{l+1,j} = a_E = D_e \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_e|)^5\right] + \max[-F_e, 0] \quad (4.35)$$

$$a_{l,j+1} = a_N = D_n \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_n|)^5\right] + \max[-F_n, 0] \quad (4.36)$$

$$a_{l,j-1} = a_S = D_s \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_s|)^5\right] + \max[F_s, 0] \quad (4.37)$$

gdje su  $F$  i  $D$  konvektivni fluks i difuzijska vodljivost koji se računaju prema prije navedenim izrazima (4.15) do (4.22), a s  $\text{Pe}$  definiran je njihov odnos tj. vrijedi

$$\text{Pe} = \frac{F}{D} \quad (4.38).$$

Izvorni član  $b_{l,j}$  računa se primjenom izraza

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot W_{X,l,j}^0 \quad (4.39)$$

gdje je  $W_{X,l,j}^0$  brzina  $W_X$  u promatranom čvoru  $(i,j)$  u prethodnom vremenskom koraku, a koeficijent  $a_{l,j}^0$  računa se kao

$$a_{l,j}^0 = \frac{\Delta X \cdot \Delta R}{\Delta \tau} \quad (4.40).$$

Koeficijent  $a_{l,j}$  uz nepoznatu brzinu  $W_{X,l,j}$  računa se primjenom izraza

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j-1} + a_{l,j+1} + a_{l,j}^0 \quad (4.41).$$

Na sličan se način vrši i proračun koeficijenata  $a_{nb}$ ,  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  u jednadžbi očuvanja količine gibanja brzine  $W_R$ . Koeficijenti  $a_{nb}$  računaju se primjenom potencijalne sheme na sljedeći način

$$a_{l-1,j} = a_W = D_w \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_w|)^5\right] + \max[F_w, 0] \quad (4.42)$$

$$a_{l+1,j} = a_E = D_e \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_e|)^5\right] + \max[-F_e, 0] \quad (4.43)$$

$$a_{l,j+1} = a_N = D_n \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_n|)^5\right] + \max[-F_n, 0] \quad (4.44)$$

$$a_{l,j-1} = a_S = D_s \cdot \max\left[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_s|)^5\right] + \max[F_s, 0] \quad (4.45)$$

gdje se konvektivni fluks  $F$  i difuzijska vodljivost  $D$  računaju prema prije navedenim izrazima (4.24) do (4.31), a s  $\text{Pe}$  je definiran njihov odnos.

Izvorni član  $b_{l,j}$  računa se primjenom izraza

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot W_{R,l,j}^0 \quad (4.46)$$

gdje je  $W_{R,l,j}^0$  brzina  $W_R$  u promatranom čvoru  $(l,j)$  u prethodnom vremenskom koraku, a koeficijent  $a_{l,j}^0$  računa se kao

$$a_{l,j}^0 = \frac{\Delta X \cdot \Delta R}{\Delta \tau} \quad (4.47).$$

Koeficijent  $a_{l,j}$  uz nepoznatu brzinu  $W_{R,l,j}$  računa se primjenom izraza

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j-1} + a_{l,j+1} + a_{l,j}^0 + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{R_{l,j}^2} \cdot \Delta X \cdot \Delta R \quad (4.48).$$

Na temelju izračunatih koeficijenata  $a_{nb}$ ,  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  za brzine  $W_X$ , odnosno  $a_{nb}$ ,  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  za brzine  $W_R$  te pretpostavljenih polja brzina  $W_X$  i  $W_R$  u nastavku se računaju polja tzv. pseudobrзина primjenom sljedećih izraza

$$\hat{W}_{X,l,j} = \frac{\sum a_{nb} \cdot W_{X,nb} + b_{l,j}}{a_{l,j}} \quad (4.49)$$

$$\hat{W}_{R,l,j} = \frac{\sum a_{nb} \cdot W_{R,nb} + b_{l,j}}{a_{l,j}} \quad (4.50).$$

Jednadžbe očuvanja količine gibanja u diskretiziranom obliku mogu se sada napisati kao

$$W_{X,l,j} = \hat{W}_{X,l,j} + d_{l,j} \cdot (P_{l,j} - P_{l+1,j}) \quad (4.51)$$

$$W_{R,l,j} = \hat{W}_{R,l,j} + d_{l,j} \cdot (P_{l,j} - P_{l,j+1}) \quad (4.52)$$

gdje je  $d_{l,j} = \frac{A_{l,j}}{a_{l,j}}$ , odnosno  $d_{l,j} = \frac{A_{l,j}}{a_{l,j}}$ .

Jednadžba diskretizacije diferencijalne jednadžbe očuvanja mase ima oblik

$$[(W_X \cdot A)_{l,j} - (W_X \cdot A)_{l-1,j}] + [(W_R \cdot A)_{l,j} - (W_R \cdot A)_{l,j-1}] = 0 \quad (4.53).$$

Uvrštavanjem izraza za brzine (4.51) i (4.52) slijedi

$$\left[ A_{i,j} \cdot \left( \hat{W}_{X,i,j} + d_{i,j} \cdot (P_{i,j} - P_{i+1,j}) \right) - A_{i-1,j} \cdot \left( \hat{W}_{X,i-1,j} + d_{i-1,j} \cdot (P_{i-1,j} - P_{i,j}) \right) \right] + \left[ A_{i,j} \cdot \left( \hat{W}_{R,i,j} + d_{i,j} \cdot (P_{i,j} - P_{i,j+1}) \right) - A_{i,j-1} \cdot \left( \hat{W}_{R,i,j-1} + d_{i,j-1} \cdot (P_{i,j-1} - P_{i,j}) \right) \right] = 0 \quad (4.54)$$

Ovu je jednadžbu moguće napisati tako da se dobije jednadžba diskretizacije za tlak u obliku

$$a_{i,j} \cdot P_{i,j} = a_{i+1,j} \cdot P_{i+1,j} + a_{i-1,j} \cdot P_{i-1,j} + a_{i,j+1} \cdot P_{i,j+1} + a_{i,j-1} \cdot P_{i,j-1} + b_{i,j} \quad (4.55)$$

Usporedbom s jednadžbom (4.54) slijede koeficijenti  $a$  u sljedećem obliku

$$a_{i+1,j} = a_E = d_{i,j} \cdot \Delta R \quad (4.56)$$

$$a_{i-1,j} = a_W = d_{i-1,j} \cdot \Delta R \quad (4.57)$$

$$a_{i,j+1} = a_N = d_{i,j} \cdot \Delta X \quad (4.58)$$

$$a_{i,j-1} = a_S = d_{i,j-1} \cdot \Delta X \quad (4.59)$$

$$a_{i,j} = a_{i+1,j} + a_{i-1,j} + a_{i,j+1} + a_{i,j-1} \quad (4.60)$$

$$b_{i,j} = \left[ \left( \hat{W}_X \right)_w - \left( \hat{W}_X \right)_e \right] \cdot \Delta R + \left[ \left( \hat{W}_R \right)_s - \left( \hat{W}_R \right)_n \right] \cdot \Delta X = \left( \hat{W}_{X,i+1,j} - \hat{W}_{X,i,j} \right) \cdot \Delta R + \left( \hat{W}_{R,i,j+1} - \hat{W}_{R,i,j} \right) \cdot \Delta X \quad (4.61)$$

Ovom jednadžbom dobiva se polje tlaka, te se dobiveni tlak tretira kao pretpostavka  $P^*$ . Uvrštavanjem dobivenih tlakova  $P^*$  u diskretizirane jednadžbe očuvanja količine gibanja na način

$$a_{i,j} \cdot W_{X,i,j} = \sum a_{nb} \cdot W_{X,nb} + (P_{i,j}^* - P_{i+1,j}^*) \cdot A_{i,j} + b_{i,j} \quad (4.62)$$

odnosno

$$a_{i,j} \cdot W_{R,i,j} = \sum a_{nb} \cdot W_{R,nb} + (P_{i,j}^* - P_{i,j+1}^*) \cdot A_{i,j} + b_{i,j} \quad (4.63)$$

zatim slijede polja brzina  $W_X^*$  i  $W_R^*$ . Ove se brzine zatim koriste za rješavanje jednadžbe korekcije tlaka

$$a_{i,j} \cdot P'_{i,j} = a_{i+1,j} \cdot P'_{i+1,j} + a_{i-1,j} \cdot P'_{i-1,j} + a_{i,j+1} \cdot P'_{i,j+1} + a_{i,j-1} \cdot P'_{i,j-1} + b_{i,j} \quad (4.64)$$

budući da se stvarno polje tlakova  $P$  dobiva korigiranjem pretpostavljenog polja tlakova  $P^*$  tj. vrijedi  $P = P^* + P'$ . Koeficijenti  $a$  u jednadžbi korekcije tlaka jednaki su koeficijentima  $a$  u jednadžbi tlaka, a razlikuje se jedino član  $b$  koji sadrži brzine i u ovom se koraku računa primjenom prethodno izračunatih brzina  $W_X^*$  i  $W_R^*$ , te slijedi

$$b_{i,j} = (W_{X,i-1,j}^* - W_{X,i,j}^*) \cdot \Delta R + (W_{R,i,j-1}^* - W_{R,i,j}^*) \cdot \Delta X \quad (4.65)$$

Rješavanjem jednadžbe korekcije tlaka slijedi polje tlakova  $P'$  pomoću kojega se zatim korigira polje brzina tj. vrijedi  $W_X = W_X^* + W_X'$  odnosno  $W_R = W_R^* + W_R'$ . Oduzimanjem jednadžbi (4.62) i (4.63) od jednadžbi očuvanja količine gibanja slijedi

$$a_{i,j} \cdot W_{X',i,j} = \sum a_{nb} \cdot W_{X',nb} + (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \cdot A_{i,j} \quad (4.66)$$

$$a_{i,j} \cdot W_{R',i,j} = \sum a_{nb} \cdot W_{R',nb} + (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \cdot A_{i,j} \quad (4.67)$$

U svrhu pojednostavljenja prethodnih jednadžbi zanemaruju se članovi  $\sum a_{nb} \cdot W_{X',nb}$  i  $\sum a_{nb} \cdot W_{R',nb}$  pa slijedi

$$a_{i,j} \cdot W_{X',i,j} = (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \cdot A_{i,j} \quad (4.68)$$

$$a_{i,j} \cdot W_{R',i,j} = (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \cdot A_{i,j} \quad (4.69)$$

odnosno

$$W_{X',i,j} = d_{i,j} \cdot (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \quad (4.70)$$

$$W_{R',i,j} = d_{i,j} \cdot (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \quad (4.71)$$

što predstavlja korekciju brzine te slijede formule za korekciju brzina u obliku

$$W_{X,i,j} = W_{X,i,j}^* + d_{i,j} \cdot (P'_{i,j} - P'_{i+1,j}) \quad (4.72)$$

$$W_{R,i,j} = W_{R,i,j}^* + d_{i,j} \cdot (P'_{i,j} - P'_{i,j+1}) \quad (4.73)$$

Ovaj se postupak primjenjuje na sve kontrolne volumene promatrane domene, te se rješavanjem sustava algebarskih jednadžbi dobivaju nepoznata polja brzina  $W_X$  i  $W_R$ . Cijeli se postupak zatim ponavlja do postizanja konvergencije polja brzina i polja tlakova. Ispuštanje članova  $\sum a_{nb} \cdot W_{X',nb}$  i  $\sum a_{nb} \cdot W_{R',nb}$  u prethodnim jednadžbama nema utjecaja na konačno rješenje polja strujanja budući da i korekcija tlaka i korekcije brzina u konvergiranim rješenjima moraju biti jednake nuli tj. dovoljno male da zadovolje zadani kriterij točnosti.

### Obrada početnih i rubnih uvjeta

Za rješavanje sustava algebarskih jednadžbi kojima je opisano polje strujanja potrebno je definirati početne i rubne uvjete. U tu svrhu početne vrijednosti brzina  $W_X$  i  $W_R$  moraju biti definirane u svim čvorovima domene. U ovom je slučaju fluid početno u stanju mirovanja pa za  $\tau = 0$  vrijedi

$$\begin{aligned} W_{X,i,j} &= 0 & \text{za } i=1, M \text{ i } j=1, N+1 & \quad \text{i} \\ W_{R,i,j} &= 0 & \text{za } I=1, M+1 \text{ i } j=1, N & \end{aligned} \quad (4.74)$$

Rubni su uvjeti sljedeći. Brzina fluida na ulazu je konstantna te vrijedi

$$\begin{aligned} W_{X i=1, J} &= 1 & \text{za } J &= 1, N \\ W_{R I=1, J} &= 0 & \text{za } j &= 1, N \end{aligned} \quad (4.75).$$

Tok je na izlazu iz spremnika topline potpuno razvijen pa su promjene brzina u smjeru toka odnosno u smjeru normale na izlaznu plohu jednake nuli odnosno vrijedi

$$\begin{aligned} W_{X I=M, J} &= W_{X I=M-1, J} & \text{za } J &= 1, N \\ W_{R I=M+1, J} &= W_{R I=M, J} & \text{za } j &= 1, N \end{aligned} \quad (4.76).$$

Na stijenci su obje komponente brzine jednake nuli odnosno vrijedi

$$\begin{aligned} W_{X I, J=N+1} &= 0 & \text{za } i &= 1, M \\ W_{R I, J=N} &= 0 & \text{za } I &= 1, M+1 \end{aligned} \quad (4.77),$$

a utjecaj stijenke na brzinu  $W_X$  potrebno je uzeti u obzir i u kontrolnom volumenu neposredno uz stijenkicu i to na sljedeći način. Smično naprezanje na stijenci u bezdimenzijskom obliku računa se kao

$$\theta_w = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{W_{XP}}{\Delta R_p} \quad (4.78)$$

pri čemu je bezdimenzijsko naprezanje definirano kao

$$\theta_w = \frac{\tau_w}{\rho_f \cdot w_m^2}, \text{ a smično je naprezanje } \tau_w = \eta_d \cdot \frac{W_{XP}}{\Delta R_p} \text{ pa se uvrštavanjem bezdimenzijskih veličina dobiva izraz (4.78).}$$

S  $W_{XP}$  označena je brzina u čvoru kontrolnog volumena, a s  $\Delta R_p$  udaljenost čvora od stijenke. Smična se sila računa kao

$$F_s = -\theta_w \cdot \Delta X = -\frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{W_{XP}}{\Delta R_p} \cdot \Delta X \text{ gdje je } \Delta X \text{ površina kontrolnog volumena na stijenci.}$$

Jednadžba diskretizacije jednadžbe očuvanja količine gibanja za brzinu  $W_X$  u čvoru  $(i, J)$  ima oblik

$$a_{i, J} \cdot W_{X i, J} = \sum a_{nb} \cdot W_{X nb} + b_{i, J} + (P_{I, J} - P_{I+1, J}) \cdot \Delta R \quad (4.79)$$

pri čemu se izvorni član računa kao

$b_{i, J} = S_{p i, J} \cdot W_{X i, J} + S_{u i, J}$  pa se smična sila u jednadžbu diskretizacije uvrštava kao izvorni član odnosno

$$S_{p i, J} = -\frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{\Delta R_{i, J}} \cdot \Delta X \quad (4.80)$$

te uvrštavanjem u jednadžbu diskretizacije slijedi da se utjecaj stijenke na brzinu  $W_X$  uzima u obzir tako da se u izraz za koeficijent  $a_{i, J}$  ubroji i član  $S_{p i, J}$  odnosno za kontrolni volumen uz stijenkicu vrijedi

$$a_{i, J} = a_{i-1, J} + a_{i+1, J} + a_{i, J-1} + a_{i, J+1} + a^0_{i, J} + \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{1}{\Delta R_{i, J}} \cdot \Delta X \quad (4.81)$$

pri čemu se koeficijenti  $a$  i  $a^0$  računaju prema izrazima (4.34), (4.35), (4.36), (4.37) i (4.40).

Na osi simetrije nema protoka u smjeru normale pa su brzine u smjeru normale, kao i promjene brzina u smjeru toka jednake nuli tj. vrijedi

$$\begin{aligned} W_{X i, J=1} &= W_{X i, J=2} & \text{za } i &= 1, M \\ W_{R I, J=1} &= 0 & \text{za } I &= 1, M+1 \end{aligned} \quad (4.82).$$

Ukoliko je neka od brzina koje utječu na tlak u promatranom kontrolnom volumenu poznata, onda se koeficijent  $a$  u jednadžbi diskretizacije za tlak, koji se odnosi na susjedni čvor uz tu stranicu kontrolnog volumena, postavlja na nulu, a u izvorni se član, umjesto pretpostavljene brzine, uvrštava zadana odnosno poznata brzina što predstavlja rubni uvjet u jednadžbi tlaka.

Definirani početni i rubni uvjeti ugrađuju se u jednadžbe diskretizacije za proračun nestacionarnog dvodimenzijskog polja strujanja fluida, te rješavanjem sustava algebarskih jednadžbi slijede nepoznate raspodjele brzina fluida  $W_X$  i  $W_R$  te nepoznata raspodjela tlakova  $P$ .

#### 4.2.3 Jednadžbe diskretizacije za proračun nestacionarnog temperaturnog polja fluida, stijenke i akumulatora topline latentnog spremnika topline u cilindričnom koordinatnom sustavu

Zakon očuvanja varijable  $\Psi$  za slučaj nestacionarnog toka u bezdimenzijskom obliku ima opći oblik

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} + \text{div}(\Psi \cdot \vec{W}) = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) + S_\Psi \quad (4.83)$$

odnosno u integralnom obliku

$$\int_{CV} \left( \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau} d\tau \right) dV + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Psi \cdot \vec{W}) dA \right) d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) dA \right) d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{CV} S_\Psi dV \cdot d\tau \quad (4.84).$$



Diferencijalna jednadžba kojom je definirano temperaturno polje proizlazi iz opće jednadžbe očuvanja uvrštavanjem umjesto varijable  $\Psi$  vrijednosti bezdimenzijske temperature  $\Theta$  ili bezdimenzijske entalpije  $\chi$  te umjesto koeficijenta difuzije  $\Gamma$  bezdimenzijske veličine  $\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}}$ .

Oblik opće jednadžbe očuvanja ovisi o činjenici da li se prijelaz topline odvija provođenjem ili konvekcijom tj. da li je prijelaz topline čisto difuzijskog tipa ili je konveksijsko difuzijskog tipa.

U slučaju prijelaza topline konvekcijom diferencijalna jednadžba slijedi uvrštavanjem vrijednosti bezdimenzijske temperature  $\Theta$  umjesto varijable  $\Psi$ , te vrijednosti bezdimenzijske veličine  $\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}}$  umjesto koeficijenta difuzije  $\Gamma$  u opću jednadžbu očuvanja (4.83). Kod spremnika latentne topline toplina se konvekcijom prenosi s fluida na stijenku cijevi, pa za fluid jednadžba očuvanja energije u dvodimenzijom cilindričnom koordinatnom sustavu ima oblik

$$\frac{\partial \Theta_f}{\partial \tau} + W_x \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial X} + W_R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \left[ \frac{\partial^2 \Theta_f}{\partial X^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_f}{\partial R} \right) \right] \quad (4.85).$$

U slučaju izmjene topline provođenjem u općoj jednadžbi očuvanja zanemaruje se konvektivni član te ona ima sljedeći oblik

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \tau} = \text{div}(\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) + S_\Psi \quad (4.86)$$

odnosno u integralnom obliku

$$\int_{CV} \left( \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \Psi}{\partial \tau} d\tau \right) dV = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \cdot \text{grad} \Psi) dA \right) d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{CV} S_\Psi dV \cdot d\tau \quad (4.87).$$

Diferencijalna jednadžba provođenja topline slijedi uvrštavanjem vrijednosti bezdimenzijske temperature  $\Theta$  ili bezdimenzijske entalpije  $\chi$  umjesto varijable  $\Psi$  te bezdimenzijskih veličina

$\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f}$  odnosno vrijednosti  $\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f}$  umjesto koeficijenta difuzije  $\Gamma$ . U slučaju spremnika

latentne topline vrši se provođenje topline kroz stijenku cijevi, pa jednadžba očuvanja energije u dvodimenzijom cilindričnom koordinatnom sustavu ima oblik

$$\frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \Theta_w}{\partial X^2} \right] \quad (4.88).$$

Budući da se izmjena topline unutar akumulatora topline dominantno odvija provođenjem na sličan se način dobiva entalpijska diferencijalna jednadžba kojom je opisana temperaturna raspodjela unutar akumulatora topline te ima oblik

$$\frac{\partial \chi_p}{\partial \tau} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \left[ \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( R \cdot \frac{\partial \chi_p}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \chi_p}{\partial X^2} \right] \quad (4.89).$$

Fluid akumulira toplinu za vrijeme taljenja pri konstantnoj temperaturi pa je pripadajuća entalpija  $\chi$  povezana s temperaturom jednadžbom  $\Theta_p = A_b \cdot \chi_p + B_b$  pri čemu vrijedi

$$A_b = \frac{1}{\text{St}} \cdot \frac{\rho_l \cdot c_l}{\rho_s \cdot c_s}, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad \chi_p < 0 \quad \text{tj. u krutoj fazi}$$

$$A_b = 0, \quad B_b = 0 \quad \text{za} \quad 0 \leq \chi_p \leq 1 \quad \text{tj. u vrijeme promjene agregatnog stanja}$$

$$A_b = \frac{1}{\text{St}}, \quad B_b = -\frac{1}{\text{St}} \quad \text{za} \quad \chi_p > 1 \quad \text{tj. u kapljevitoj fazi.}$$

Jednadžba diskretizacije konveksijsko difuzijske jednadžbe ima oblik

$$a_{l,j} \cdot \Theta_{f,l,j} = a_{l+1,j} \cdot \Theta_{f,l+1,j} + a_{l,j} \cdot \Theta_{f,l-1,j} + a_{l,j+1} \cdot \Theta_{f,l,j+1} + a_{l,j-1} \cdot \Theta_{f,l,j-1} + b_{l,j} \quad (4.90).$$

Osnovni je problem pri diskretizaciji konveksijsko difuzijske jednadžbe diskretizacija konvektivnog člana odnosno konvektivnog fluksa zavisne varijable kroz granice kontrolnog volumena. Kao i u proračunu polja strujanja u ovom je radu diskretizacija konveksijsko difuzijske jednadžbe izvršena primjenom potencijalne sheme prema kojoj se koeficijenti  $a$  uz temperature u susjednim čvorovima mreže računaju primjenom izraza

$$a_{l,j} = a_w = D_w \cdot \max[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_w|)^5] + \max[F_w, 0] \quad (4.91)$$

$$a_{l+1,j} = a_e = D_e \cdot \max[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_e|)^5] + \max[-F_e, 0] \quad (4.92)$$

$$a_{l,j+1} = a_n = D_n \cdot \max[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_n|)^5] + \max[-F_n, 0] \quad (4.93)$$

$$a_{l,j-1} = a_s = D_s \cdot \max[0, (1 - 0,1 \cdot |\text{Pe}_s|)^5] + \max[F_s, 0] \quad (4.94)$$

gdje su  $F$  i  $D$  konvektivni fluks i difuzijska vodljivost na granicama promatranog kontrolnog volumena a računaju se primjenom izraza

$$F_e = (W_X \cdot A)_e = W_{X_{I,J}} \cdot \Delta R \quad (4.95)$$

$$F_w = (W_X \cdot A)_w = W_{X_{I-1,J}} \cdot \Delta R \quad (4.96)$$

$$F_n = (W_R \cdot A)_n = W_{R_{I,J}} \cdot \Delta X \quad (4.97)$$

$$F_s = (W_R \cdot A)_s = W_{R_{I,J-1}} \cdot \Delta X \quad (4.98)$$

$$D_e = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{\Delta R}{X_{I+1} - X_I} \quad (4.99)$$

$$D_w = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{\Delta R}{X_I - X_{I-1}} \quad (4.100)$$

$$D_n = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{\Delta X}{R_{J+1} - R_J} \quad (4.101)$$

$$D_s = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{\Delta X}{R_J - R_{J-1}} \quad (4.102)$$

dok je Pecletov broj  $\text{Pe} = \frac{F}{D}$ ,

Izvorni se član  $b_{I,J}$  računa kao

$$b_{I,J} = a_{I,J}^0 \cdot \Theta_{I,J}^0 \quad (4.103)$$

gdje je  $\Theta_{I,J}^0$  bezdimenzijska temperatura fluida u promatranom čvoru  $(I,J)$  u prethodnom vremenskom koraku, a koeficijent  $a_{I,J}^0$  računa se primjenom izraza

$$a_{I,J}^0 = \frac{\Delta X \cdot \Delta R}{\Delta \tau} \quad (4.104)$$

Koeficijent  $a_{I,J}$  uz nepoznatu temperaturu u čvoru  $(I,J)$  računa se kao

$$a_{I,J} = a_{I+1,J} + a_{I-1,J} + a_{I,J+1} + a_{I,J-1} + a_{I,J}^0 \quad (4.105)$$

Na ovaj se način dobiva sustav algebarskih jednadžbi kojim je opisano temperaturno polje fluida odnosno prijelaz topline konvekcijom s fluida na stijenku cijevi.

Provođenje topline kroz stijenku cijevi definirano je Fourierovom diferencijalnom jednadžbom provođenja topline (3.45). Integracijom diferencijalne jednadžbe po kontrolnom volumenu i po vremenskom intervalu  $\Delta \tau$  slijedi

$$\int_{CV} \left( \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} \cdot d\tau \right) \cdot dV = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_{CV} \frac{\partial}{\partial X} \left( \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\partial \Theta_w}{\partial X} \right) \cdot dV \right) \cdot d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left( \int_{CV} \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left( \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot R \cdot \frac{\partial \Theta_w}{\partial R} \right) \cdot dV \right) \cdot d\tau \quad (4.106)$$

Za prikaz nestacionarnog člana pretpostavlja se da vrijednost temperature u čvoru prevladava na cijelom kontrolnom volumenu te vrijedi

$$\int_{CV} \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \frac{\partial \Theta_w}{\partial \tau} \cdot d\tau \cdot dV = dV \cdot (\Theta_w - \Theta_w^0) \quad (4.107)$$

gdje je  $\Theta_w^0$  bezdimenzijska temperatura u vremenu  $\tau$ , a  $\Theta_w$  bezdimenzijska temperatura u vremenu  $\tau + \Delta \tau$ .

Za određivanje integrala na desnoj strani jednadžbe odnosno integrala difuzijskih članova koriste se funkcije interpolacije koje predstavljaju promjenu vrijednosti temperature među čvorovima mreže. Ukoliko se pretpostavi linearna funkcija interpolacije te uz uvjet konstantnih fizikalnih svojstava slijedi

$$(\Theta_w - \Theta_w^0) \cdot \Delta V = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \left[ \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot A \cdot \left( \frac{\Theta_{wE} - \Theta_{wP}}{\Delta X_{PE}} - \frac{\Theta_{wP} - \Theta_{wW}}{\Delta X_{WP}} \right) + \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot A \cdot \left( \frac{\Theta_{wN} - \Theta_{wP}}{\Delta R_{PN}} - \frac{\Theta_{wP} - \Theta_{wS}}{\Delta R_{SP}} \right) \right] \cdot d\tau \quad (4.108)$$

gdje je  $A$  površina granice kontrolnog volumena.

Za proračun desne strane jednadžbe potrebno je definirati kako se temperatura mijenja s vremenom od  $\tau$  do  $\tau + \Delta \tau$ , pa se pretpostavlja da vrijedi sljedeće

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Theta_w \cdot d\tau = [f \cdot \Theta_w + (1-f) \cdot \Theta_w^0] \cdot \Delta \tau \quad (4.109)$$

gdje je  $f$  faktor ocjene s vrijednostima u intervalu  $[0,1]$ .

U ovom je radu zbog svoje bezuvjetne stabilnosti korištena potpuno implicitna shema promjene temperature s vremenom za koju je  $f = 1$  pa slijedi

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \Theta_w \cdot d\tau = \Theta_w \cdot \Delta \tau \quad (4.110)$$

Uvrštavanjem u izraz (4.108) slijedi

$$\frac{\Delta R \cdot \Delta X}{\Delta \tau} \cdot (\Theta_w - \Theta_w^0) = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \left( \frac{\Theta_{wE} - \Theta_{wP}}{\Delta X} - \frac{\Theta_{wP} - \Theta_{wS}}{\Delta X} \right) \cdot \Delta R + \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \left( \frac{\Theta_{wN} - \Theta_{wP}}{\Delta R} - \frac{\Theta_{wP} - \Theta_{wS}}{\Delta R} \right) \cdot \Delta X \quad (4.111).$$

Jednadžba diskretizacije ima oblik

$$a_p \cdot \Theta_{wP} = a_E \cdot \Theta_{wE} + a_W \cdot \Theta_{wW} + a_N \cdot \Theta_{wN} + a_S \cdot \Theta_{wS} + b \quad \text{odnosno} \\ a_{I,J} \cdot \Theta_{wI,J} = a_{I+1,J} \cdot \Theta_{wI+1,J} + a_{I-1,J} \cdot \Theta_{wI-1,J} + a_{I,J+1} \cdot \Theta_{wI,J+1} + a_{I,J-1} \cdot \Theta_{wI,J-1} + b_{I,J} \quad (4.112).$$

Usporedbom izraza (4.111) i (4.112) slijede koeficijenti  $a$  i izvorni član  $b$  u obliku

$$a_{I+1,J} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta X} \quad (4.113)$$

$$a_{I-1,J} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta X} \quad (4.114)$$

$$a_{I,J+1} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta R} \quad (4.115)$$

$$a_{I,J-1} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta R} \quad (4.116)$$

$$b_{I,J} = a_{I,J}^0 \cdot \Theta_{wI,J}^0 \quad \text{gdje je} \quad a_{I,J}^0 = \frac{\Delta R \cdot \Delta X}{\Delta \tau} \quad i \quad (4.117)$$

$$a_{I,J} = a_{I+1,J} + a_{I-1,J} + a_{I,J+1} + a_{I,J-1} + a_{I,J}^0 \quad (4.118).$$

Formiranjem ovakvih jednadžbi za sve kontrolne volumene slijedi sustav algebarskih jednadžbi kojim je definirano temperaturno polje stijenke cijevi.

Na sličan se način dobiva i sustav algebarskih jednadžbi kojim je definirano polje bezdimenzijskih entalpija akumulatora topline. Entalpijska se jednadžba dobiva uvrštavanjem entalpija kao nepoznanica u opću jednadžbu očuvanja, a zatim integracijom diferencijalne jednadžbe po kontrolnom volumenu i vremenskom intervalu slijedi jednadžba diskretizacije u obliku

$$a_{I,J} \cdot \chi_{pI,J} = a_{I+1,J} \cdot \chi_{pI+1,J} + a_{I-1,J} \cdot \chi_{pI-1,J} + a_{I,J+1} \cdot \chi_{pI,J+1} + a_{I,J-1} \cdot \chi_{pI,J-1} + b_{I,J} \quad (4.119)$$

gdje je

$$a_{I+1,J} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta X} \quad (4.120)$$

$$a_{I-1,J} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta X} \quad (4.121)$$

$$a_{I,J+1} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta R} \quad (4.122)$$

$$a_{I,J-1} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{\Delta X}{\Delta R} \quad (4.123)$$

$$b_{I,J} = a_{I,J}^0 \cdot \chi_{pI,J}^0 \quad (4.124)$$

$$a_{I,J}^0 = \frac{\Delta R \cdot \Delta X}{\Delta \tau} \quad i \quad (4.125)$$

$$a_{I,J} = a_{I+1,J} + a_{I-1,J} + a_{I,J+1} + a_{I,J-1} + a_{I,J}^0 \quad (4.126).$$

### Obrada početnih i rubnih uvjeta

Za rješavanje sustava algebarskih jednadžbi kojima je opisano temperaturno polje unutar spremnika latentne topline potrebno je također definirati početne i rubne uvjete. U tu je svrhu definirana jednolika početna raspodjela temperatura fluida, stijenke i akumulatora topline pa za  $\tau = 0$  vrijedi

$$\Theta_{fI,J} = \Theta_{\text{mit}} \quad \text{za} \quad I = 1, M+1 \quad \text{i} \quad J = 1, N \\ \Theta_{wI,J} = \Theta_{\text{mit}} \quad \text{za} \quad I = 1, M+1 \quad \text{i} \quad J = N+1, NN \\ \Theta_{pI,J} = \Theta_{\text{mit}} \quad \text{za} \quad I = 1, M+1 \quad \text{i} \quad J = NN+1, NNN \quad (4.127).$$

Rubni se uvjeti mogu podijeliti u dva osnovna tipa. Prvi je geometrijski rubni uvjet koji uključuje zadanu temperaturu na rubu. Ovaj se rubni uvjet u slučaju spremnika latentne topline odnosi na fluid za kojega se pretpostavlja da ulazi u spremnik s konstantnom temperaturom, pa vrijedi

$$\Theta_{fI=1,J} = 1 \quad \text{za} \quad J = 2, N \quad (4.128).$$

Drugi je tip rubnih uvjeta prirodni rubni uvjet prema kojem je zadan toplinski tok kroz rubnu površinu. U slučaju fluida pretpostavlja se da nema toplinskih gubitaka kroz izlaznu površinu odnosno toplinski je tok kroz izlaznu površinu jednak nuli pa vrijedi

$$\Theta_{fI=M+1,J} = \Theta_{fI=M,J} \quad \text{za} \quad J = 2, N \quad (4.129).$$

Toplina se u tankom sloju uz površinu stijenke izmjenjuje samo provođenjem pa se bezdimenzijski toplinski tok uvrštavanjem prethodno definiranih bezdimenzijskih veličina te bezdimenzijskog toka, definiranog kao

$$\bar{q} = \frac{q}{w \cdot D \cdot c \cdot \rho \cdot (T_{\text{in}} - T_{\text{m}})} \quad (4.130)$$

u Fourierovu jednadžbu provođenja topline može izraziti kao

$$\bar{q} = -\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{A}{\Delta R_{\text{fw}}} \cdot (\Theta_f - \Theta_w) \quad (4.131)$$

gdje je  $A$  površina granice kontrolnog volumena.

Toplina se izmjenjuje provođenjem kroz sloj fluida debljine  $\Delta R_f$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_f$  i sloj stijenke debljine  $\Delta R_w$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_w$  pa vrijedi

$$\bar{q} = -\frac{A}{\frac{\Delta R_f}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} + \frac{\Delta R_w}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \cdot (\Theta_f - \Theta_w) = -\frac{A}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_w \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \cdot (\Theta_f - \Theta_w) \quad (4.132).$$

Toplinski se tok kao izvorni član u jednadžbama diskretizacije može izraziti i kao

$$\bar{q}_{l,j} = S_{p,l,j} \cdot \Theta_{f,l,j} + S_{u,l,j} \quad (4.133)$$

pa usporedbom s prethodnom jednadžbom, uz  $A = \Delta X$ , slijedi

$$S_{p,l,j} = -\frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_w \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \quad \text{i} \quad S_{u,l,j} = \frac{\Delta X \cdot \Theta_{w,i,j+1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_w \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \quad (4.134),$$

te se koeficijenti  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  za kontrolni volumen uz površinu stijenke računaju kao

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j-1} + a_{l,j}^0 + \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_w \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \quad \text{i} \quad (4.135)$$

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot \Theta_{f,l,j}^0 + \frac{\Delta X \cdot \Theta_{w,l,j+1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_w \cdot \frac{\lambda_f}{\lambda_w}} \quad (4.136).$$

Rubnim uvjetom na osi simetrije definirano je da ne postoji fluks skalara odnosno temperature kroz granicu pa vrijedi

$$\Theta_{f,l,I=1} = \Theta_{f,l,I=2} \quad \text{za} \quad I = 1, M \quad (4.137).$$

U slučaju provođenja topline kroz stijenku cijevi rubni su uvjeti sljedeći. Nema toplinskih gubitaka kroz ulaznu i izlaznu površinu stijenke pa vrijedi

$$\begin{aligned} \Theta_{w,l=1,j} &= \Theta_{w,l=2,j} & \text{za} \quad J &= N+1, NN \\ \Theta_{w,l=M+1,j} &= \Theta_{w,l=M,j} & \text{za} \quad J &= N+1, NN \end{aligned} \quad (4.138).$$

Na graničnoj površini između stijenke i fluida, toplina se izmjenjuje samo provođenjem pa je bezdimenzijski toplinski tok

$$\bar{q} = -\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{A}{\Delta R_{wf}} \cdot (\Theta_w - \Theta_f) \quad (4.139).$$

Toplina se provodi kroz sloj fluida debljine  $\Delta R_f$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_f$  i sloj stijenke debljine  $\Delta R_w$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_w$ , pa uz  $A = \Delta X$  vrijedi

$$\bar{q} = -\frac{\Delta X}{\frac{\Delta R_w}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_f}{a_w} + \frac{\Delta R_f}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \cdot (\Theta_w - \Theta_f) = -\frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \cdot (\Theta_w - \Theta_f) \quad (4.140)$$

odnosno

$$\bar{q}_{l,j} = S_{p,l,j} \cdot \Theta_{w,l,j} + S_{u,l,j} \quad \text{čijom usporedbom slijedi}$$

$$S_{p,l,j} = -\frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \quad \text{i} \quad S_{u,l,j} = \frac{\Delta X \cdot \Theta_{f,l,j-1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \quad (4.141),$$

pa se koeficijenti  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  za kontrolni volumen uz površinu fluida računaju po izrazima

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j+1} + a_{l,j}^0 + \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \quad \text{i} \quad (4.142)$$

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot \Theta_{w,l,j}^0 + \frac{\Delta X \cdot \Theta_{f,l,j-1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \Delta R_f \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_f}} \quad (4.143).$$

Na isti se način tretira i rubni uvjet na graničnoj površini između stijenke i akumulatora topline gdje se toplina provodi kroz sloj stijenke debljine  $\Delta R_w$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_w$  i sloj akumulatora topline debljine  $\Delta R_p$  s toplinskom vodljivošću  $\lambda_p$  pa je toplinski tok

$$\bar{q} = -\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{A}{\Delta R_{wp}} \cdot (\Theta_w - \Theta_p) \quad (4.144)$$

ili

$$\bar{q} = \frac{\Delta X}{\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} + \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_w}{a_f} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w}} \cdot (\Theta_w - \Theta_p) = \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \cdot \Delta R_p} \cdot (\Theta_w - \Theta_p) \quad (4.145)$$

$\bar{q}_{l,j} = S_{p,l,j} \cdot \Theta_{w,l,j} + S_{u,l,j}$  odnosno slijedi

$$S_{p,l,j} = \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \cdot \Delta R_p} \quad \text{i} \quad S_{u,l,j} = \frac{\Delta X \cdot \Theta_{p,l,j+1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \cdot \Delta R_p} \quad (4.146),$$

pa se koeficijenti  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  računaju kao

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j-1} + a_{l,j}^0 + \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \cdot \Delta R_p} \quad \text{i} \quad (4.147)$$

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot \Theta_{w,l,j}^0 + \frac{\Delta X \cdot \Theta_{p,l,j+1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \Delta R_w + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_w} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p} \cdot \Delta R_p} \quad (4.148).$$

U slučaju izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline rubni su uvjeti sljedeći. Kao i za stijenku, zanemareni su toplinski gubici kroz ulaznu i izlaznu plohu, kao i toplinski gubici kroz vanjsku stijenku spremnika odnosno pretpostavlja se da je spremnik prema okolišu idealno izoliran, pa vrijedi

$$\begin{aligned} \Theta_{p,l=1,j} &= \Theta_{p,l=2,j} & \text{za } J &= \text{NN} + 1, \text{NNN} \\ \Theta_{p,l=M+1,j} &= \Theta_{p,l=M,j} & \text{za } J &= \text{NN} + 1, \text{NNN} \\ \Theta_{p,l,j=\text{NNN}+1} &= \Theta_{p,l,j=\text{NNN}} & \text{za } I &= 1, M + 1 \end{aligned} \quad (4.149).$$

Na graničnoj površini izmjeđu stijenke i akumulatora topline toplina se izmjenjuje samo provođenjem i to kroz sloj stijenke debljine  $\Delta R_w$  s koeficijentom toplinske vodljivosti  $\lambda_w$  i sloj akumulatora topline debljine  $\Delta R_p$  s koeficijentom toplinske vodljivosti  $\lambda_p$  pa je toplinski tok

$$\bar{q} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{A}{\Delta R_{pw}} \cdot (\Theta_p - \Theta_w) \quad (4.150).$$

$$\bar{q} = \frac{\Delta X}{\frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} + \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \frac{a_p}{a_f} \cdot \frac{\lambda_w}{\lambda_p}} \cdot (\Theta_p - \Theta_w) = \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \Delta R_p + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \Delta R_w} \cdot (\Theta_p - \Theta_w) \quad (4.151)$$

odnosno ukoliko se u jednadžbu umjesto temperature uvrsti entalpija izvorni se član može računati kao

$$b_{l,j} = S_{p,l,j} \cdot \chi_{p,l,j} + S_{u,l,j} \quad \text{pa slijedi}$$

$$S_{p,l,j} = \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \Delta R_p + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \Delta R_w} \quad \text{i} \quad S_{u,l,j} = \frac{\Delta X \cdot \chi_{w,l,j-1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \Delta R_p + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \Delta R_w}, \quad (4.152)$$

te se koeficijenti  $a_{l,j}$  i  $b_{l,j}$  za kontrolni volumen uz površinu stijenke računaju po izrazima

$$a_{l,j} = a_{l-1,j} + a_{l+1,j} + a_{l,j+1} + a_{l,j}^0 + \frac{\Delta X}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \Delta R_p + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \Delta R_w} \quad \text{i} \quad (4.153)$$

$$b_{l,j} = a_{l,j}^0 \cdot \chi_{p,l,j}^0 + \frac{\Delta X \cdot \chi_{w,l,j-1}}{\text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \Delta R_p + \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{a_f}{a_p} \cdot \frac{\lambda_p}{\lambda_w} \cdot \Delta R_w} \quad (4.154).$$

Definirani početni i rubni uvjeti ugrađuju se u jednadžbe diskretizacije za proračun nestacionarnog dvodimenzijskog temperaturnog polja unutar spremnika latentne topline, te rješavanjem sustava algebarskih jednadžbi slijede nepoznate raspodjele temperatura fluida i stijenke te raspodjele entalpija odnosno temperatura akumulatora topline.

### 4.3 Proračun eksergijske iskoristivosti spremnika latentne topline

Za određivanje iskoristivosti spremnika topline u ovom je radu primijenjena eksergijska analiza zasnovana na drugom glavnom zakonu termodinamike kojom je uzeta u obzir ne samo količina već i kvaliteta odnosno radna sposobnost akumulirane energije. Određivanje eksergijske iskoristivosti vrši se na temelju numerički proračunatih nestacionarnih temperaturnih polja fluida i akumulatora topline i to na sljedeći način.

Eksergija koja strujanjem fluida ulazi u spremnik latentne topline definirana je izrazom

$$E_{in} = \int_0^t \dot{m}_f \cdot c_f \cdot \left( T_{fin} - T_{ok} - T_{ok} \cdot \ln \frac{T_{fin}}{T_{ok}} \right) \cdot dt \quad (4.155),$$

a eksergija na izlazu iz spremnika izrazom

$$E_{out} = \int_0^t m_f \cdot c_f \cdot \left( T_{f,out} - T_{ok} - T_{ok} \cdot \ln \frac{T_{f,out}}{T_{ok}} \right) \cdot dt \quad (4.156),$$

gdje je  $T_{f,in}$  temperatura fluida na ulazu u spremnik, a  $T_{f,out}$  temperatura fluida na izlazu iz spremnika, dok je  $T_{ok}$  temperatura okoliša.

Ukupna je spremljena eksergija  $E_s$  suma eksergije akumulirane unutar akumulatora topline  $E_p$  i eksergije akumulirane u fluidu unutar spremnika  $E_f$  odnosno vrijedi

$$E_s = E_p + E_f \quad (4.157).$$

Pri tome se eksergija akumulirana unutar akumulatora topline definira izrazom

$$E_p = \sum_i \left[ m_{pi} \cdot c_s \cdot \left( T_m - T_{p,init} - T_{ok} \cdot \ln \frac{T_m}{T_{p,init}} \right) + m_{pi} \cdot q \cdot \left( 1 - \frac{T_{ok}}{T_m} \right) + m_{pi} \cdot c_L \cdot \left( T_{pi} - T_m - T_{ok} \cdot \ln \frac{T_{pi}}{T_m} \right) \right] \quad (4.158)$$

gdje je  $T_{p,init}$  početna temperatura akumulatora topline,  $T_m$  temperatura promjene faze, a  $T_{pi}$  temperatura akumulatora topline u i-tom čvoru. Eksergija se sumira po svim čvorovima mreže kojom je diskretizirano područje proračuna. Prvi član jednadžbe predstavlja eksergiju akumuliranu u krutoj fazi, drugi član eksergiju akumuliranu za vrijeme procesa taljenja, a treći član eksergiju akumuliranu u kapljevitom fazi akumulatora topline.

Eksergija akumulirana u fluidu koji se nalazi unutar spremnika definirana je izrazom

$$E_f = \sum_i m_{fi} \cdot c_f \cdot \left( T_{fi} - T_{f,init} - T_{ok} \cdot \ln \frac{T_{fi}}{T_{f,init}} \right) \quad (4.159)$$

gdje je  $T_{f,init}$  početna temperatura spremnika, a  $T_{fi}$  temperatura fluida u i-tom čvoru mreže.

Za vrijeme procesa spremanja topline unutar spremnika uništena odnosno neiskorištena je eksergija jednaka razlici predane i spremljene eksergije odnosno vrijedi

$$\begin{aligned} \text{Uništena eksergija} &= \text{Predana eksergija} && - \text{Spremljena eksergija} \\ &= \text{Ulaz eksergije} - \text{Izlaz eksergije} && - \text{Spremljena eksergija} \end{aligned}$$

tj.

$$E_{dc} = E_{in} - E_{out} - E_s \quad (4.160)$$

pa je eksergijska iskoristivost za vrijeme procesa taljenja akumulatora topline definirana kao

$$\eta_c = \frac{E_s}{E_{in} - E_{out}} \quad (4.161).$$

Za vrijeme procesa korištenja topline iz spremnika uništena odnosno neiskorištena eksergija definirana je kao

$$\begin{aligned} \text{Uništena eksergija} &= \text{Početno spremljena eksergija} && - \text{Ostatak spremljene eksergije} && - \text{Predana eksergija} \\ &= \text{Početno spremljena eksergija} && - \text{Ostatak spremljene eksergije} && - \text{Izlaz eksergije} + \text{Ulaz eksergije} \end{aligned}$$

tj.

$$E_{dd} = E_{s,init} - E_{sr} - E_{out} + E_{in} \quad (4.162)$$

gdje je  $E_{s,init}$  početno spremljena eksergija unutar spremnika, pa je eksergijska iskoristivost za vrijeme procesa pražnjenja

$$\eta_d = \frac{E_{out} - E_{in}}{E_{s,init}} \quad (4.163).$$

Eksergijska je iskoristivost ukupnog ciklusa tj. procesa spremanja i procesa korištenja topline iz spremnika latentne topline odnos predane eksergije za vrijeme procesa korištenja i spremljene eksergije za vrijeme procesa spremanja tj. može se izraziti kao umnožak iskoristivosti za vrijeme procesa spremanja i iskoristivosti za vrijeme procesa korištenja topline odnosno vrijedi

$$\eta = \eta_c \cdot \eta_d \quad (4.164).$$

## 4.4 Rješavanje sustava algebarskih jednadžbi

### 4.4.1 Sustavi algebarskih jednadžbi za proračun polja strujanja fluida te temperaturnog polja fluida, stijenke i akumulatora topline unutar latentnog spremnika

Formiranjem jednadžbi diskretizacije diferencijalnih jednadžbi kojima je opisano polje brzina, tlakova i temperatura za sve kontrolne volumene promatranog područja proračuna, te ugrađivanjem izraza kojima se tretiraju zadani početni i rubni uvjeti dobivaju se sustavi algebarskih jednadžbi u matričnom obliku

$$\mathbf{A} \cdot \Psi = \mathbf{B} \quad (4.165)$$

gdje je  $\mathbf{A}$  matrica sustava odnosno matrica koeficijenata uz nepoznanice,  $\Psi$  vektor nepoznanica kao što su  $W_X, W_R, P, \Theta$  i  $\chi$ , a  $\mathbf{B}$  vektor članova izvora. Ovi se sustavi algebarskih jednadžbi

rješavaju istovremeno primjenom iteracijskog postupka kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u.

#### 4.4.2. Opis kompjuterskog programa

Rješavanje sustava algebarskih jednadžbi definiranih primjenom numeričke metode kontrolnih volumena kojima je opisano polje strujanja i temperaturno polje unutar spremnika latentne topline izvršeno je kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u. Program započinje učitavanjem ulaznih veličina tj. konstrukcijskih i pogonskih parametara, fizikalnih svojstava radnih medija i materijala cijevi, broja čvorova mreže kojom je diskretizirano područje proračuna, početnih uvjeta, vremenskog koraka te zadanih kriterija točnosti. Za svaki se vremenski korak zatim iteracijskim putem vrši proračun polja strujanja fluida korištenjem algoritma SIMPLER do zadovoljenja zadanih kriterija točnosti polja brzina i tlakova. Nakon toga slijedi rješavanje sustava algebarskih jednadžbi za proračun temperaturnog polja fluida, stijenke i akumulatora topline unutar spremnika latentne topline primjenom iteracijskog postupka. Za zadani vremenski korak, konvergencija je u  $k+1$ -oj iteraciji postignuta kada je

$$|\Psi_{i,j}^{k+1} - \Psi_{i,j}^k| \leq \varepsilon \quad (4.166)$$

gdje je  $\varepsilon$  zadani kriterij točnosti.

Po zadovoljenju zadanih kriterija točnosti prelazi se u novi vremenski korak i postupak se ponavlja do kraja zadanog vremena proračuna. Rezultat su proračuna polja brzina, tlakova i temperatura u zadanim vremenima te eksergijska iskoristivost spremnika topline izračunata na temelju dobivenih temperaturnih polja.

## 5 Postavljanje i izvođenje eksperimentalnog dijela istraživanja

### 5.1 Radne tvari za spremanje toplinske energije

Učinkovito i ekonomično spremanje toplinske energije od posebne je važnosti za masovnu upotrebu sunčeve energije u niskotemperaturnim toplinskim sustavima. Među raznim tehnikama spremanja topline, spremanje latentne topline je od posebnog značaja zbog velike gustoće te sposobnosti spremanja toplinske energije pri konstantnoj temperaturi za vrijeme promjene agregatnog stanja radne tvari. Pri tome se uglavnom koristi promjena iz krutog u kapljevito agregatno stanje radne tvari i obratno zato što je radni tlak niži od tlaka pri promjeni iz kapljevito u plinovito odnosno iz krutog u plinovito agregatno stanje.

Svaki se spremnik latentne topline sastoji od tri osnovne komponente:

- radne tvari za spremanje toplinske energije koja mijenja agregatno stanje odnosno fazu unutar zahtijevanog temperaturnog područja u kojem se predaje i sprema najveći dio topline u obliku latentne topline promjene faze,
- spremnika odnosno posude u kojoj se nalazi radna tvar i
- površine za izmjenu topline koja služi za predaju topline s toplinskog izvora odnosno fluida na radnu tvar za spremanje toplinske energije odnosno akumulator topline te konačno s radne tvari na krajnjem korisnika.

Radne tvari za učinkovito spremanje toplinske energije u latentnim spremnicima topline moraju imati određena termofizikalna, kinetička i kemijska svojstva.

Termofizikalna svojstva koja se zahtijevaju od akumulatora topline su sljedeća:

- temperatura taljenja mora biti unutar zadanog temperaturnog intervala,
- akumulator topline mora imati veliku latentnu toplinu promjene faze (taljenja / skrućivanja) po jedinici mase da bi se sa što manjom količinom radne tvari mogla spremirati zahtijevana količina energije,
- gustoća radne tvari mora biti velika da bi volumen spremnika bio što manji,
- radna tvar mora imati veliki specifični toplinski kapacitet da bi se osiguralo dodatno znatno spremanje osjetne topline,
- akumulator topline mora imati veliku toplinsku vodljivost i krute i kapljevite faze što doprinosi bržem spremanju i korištenju energije iz spremnika,
- radna tvar mora imati male promjene volumena pri promjeni faze kako bi se mogla koristiti jednostavna geometrija spremnika i izmjenjivača topline,
- taljenje radne tvari mora biti kongruentno odnosno sastav kapljevite i krute faze radne tvari mora biti identičan.

Akumulator topline mora zadovoljiti i sljedeće kinetičko svojstvo:

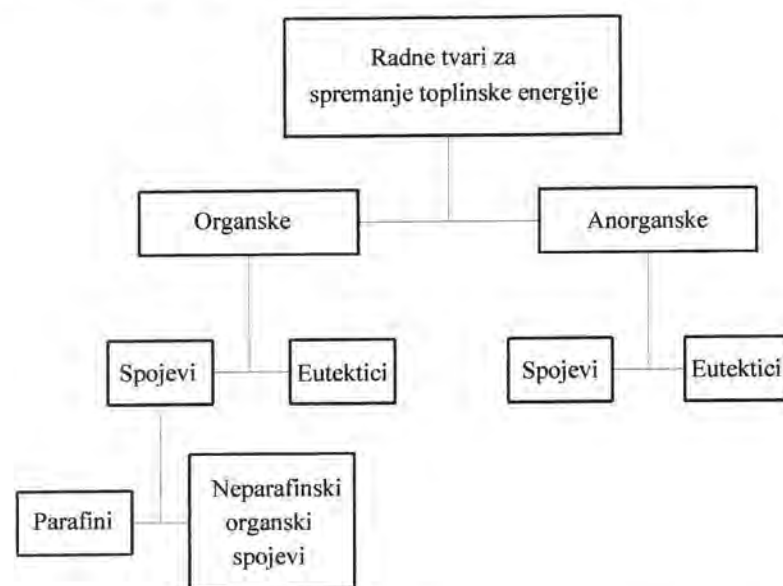
- mora imati veliku sposobnost stvaranja i rasta kristala kako bi se izbjeglo pothlađivanje kapljevite faze za vrijeme skrućivanja, odnosno zbog postizanja kristalizacije radne tvari pri temperaturi skrućivanja.

S kemijskog stajališta radna tvar mora imati sljedeća svojstva:

- kemijsku stabilnost,
- potpuno reverzibilan proces taljenja i skrućivanja,
- mora biti netoksična, nezapaljiva i neeksplozivna,
- mora biti nekorozivna u odnosu na materijal spremnika,
- ne smije doći do degradacije radne tvari nakon velikog broja ciklusa taljenja i skrućivanja.

Uz navedena je svojstva radne tvari pri njenom izboru vrlo važan i ekonomski kriterij odnosno niska cijena radne tvari kao i njena dostupnost odnosno raspoloživost u dovoljnim količinama.

Budući da ne postoji jedna tvar koja bi mogla u potpunosti zadovoljiti sva navedena svojstva u upotrebi je više vrsta akumulatora topline. Općenito, akumulatori topline koji su u primjeni u latentnim spremnicima mogu se podijeliti u dvije osnovne skupine, organske i anorganske tvari.



Slika 10. Podjela radnih tvari za spremanje toplinske energije

Organske tvari predstavljaju važnu skupinu akumulatora topline jer imaju određene prednosti u odnosu na anorganske tvari, od kojih su glavne velika sposobnost kongruentnog taljenja i velika sposobnost stvaranja kristala pri skrućivanju te kompatibilnost sa konvencionalnim konstrukcijskim materijalima spremnika. One se zatim dijele u dvije velike skupine. To su parafini i tzv. neparafinski organski spojevi.

Od anorganskih tvari najveću primjenu u latentnim spremnicima imaju hidrati soli zbog njihove velike gustoće spremanja topline.

### 5.1.1 Parafini

Parafini su organski spojevi sastavljeni od ravnih lanaca ugljikovodika na čijim se krajevima može nalaziti mali broj 2-metilnih skupina. Osnovne su komponente parafina alkani tj. zasićeni ugljikovodici karakterizirani kao  $C_nH_{2n+2}$ . Čisti parafini sastavljeni su samo od alkana npr. oktadekan  $C_{18}H_{38}$ . Temperatura taljenja alkana raste s povećanjem broja atoma ugljika. Alkani koji sadrže 14 do 40 atoma ugljika imaju tališta između 6 i 80 °C i općenito se nazivaju parafinima. Parafini su pri sobnoj temperaturi u obliku voska. Komercijalni parafinski voskovi mogu imati 8 do 15 atoma ugljika.

U krutom agregatnom stanju parafini se javljaju u dvije alotropske modifikacije koje se razlikuju u fizikalnim svojstvima i kristalnoj strukturi. Primarna modifikacija egzistira pri višoj temperaturi, meka je i plastična, a pojedinačni su kristali igličastog oblika. Sekundarna modifikacija egzistira pri nižoj temperaturi, tvrda je i krhka, a kristali su u obliku diska. Prijelaz iz jednog u drugi kristalni oblik je reverzibilan.

Parafini se koriste kao akumulatori latentne topline zbog širokog raspona temperatura taljenja i velike topline taljenja. Isto tako, poznato je da se skrućuju bez efekta pothlađivanja. Zbog velike se cijene koštanja samo tehničke vrste parafina (s manjim stupnjem čistoće) mogu koristiti kao akumulatori topline. Tehnički su parafini parafinske smjese i nisu potpuno očišćeni od ulja.

Tablica 1. Fizikalna svojstva parafina koji su u primjeni kao radne tvari za spremanje toplinske energije [48]

Parafin	Temperatura taljenja °C	Specifična toplina taljenja kJ/kg	Gustoća		Specifični toplinski kapacitet		Kočeficijent vodljivosti topline	
			kruta faza	kapljevita faza	kruta faza	kapljevita faza	kruta faza	kapljevita faza
			kg/m <sup>3</sup>		kJ/(kgK)		W/(mK)	
RT 5 <sup>1</sup>	9	205	850	771	1,8	2,4	0,17	0,18
RT 25 <sup>1</sup>	26,6	232	785	749	1,8	2,4	0,18	0,19
RT 30 <sup>1</sup>	27,7	206	789	750	1,8	2,4	0,18	0,19
RT 35 <sup>1</sup>	35,2	185	895	761	1,8	2,4	0,18	0,20
RT 40 <sup>1</sup>	42,8	181	827	769	1,8	2,4	0,19	0,20
RT 50 <sup>1</sup>	54,5	195	803	775	1,8	2,4	0,20	0,21
RT 65 <sup>1</sup>	63	207	911	785	1,8	2,4	0,20	0,21
RT 80 <sup>1</sup>	80,5	209	920	872	1,8	2,4	0,21	0,22
RT 90 <sup>1</sup>	90	197	950	770	1,8	2,4	0,22	0,23
RT 110 <sup>1</sup>	111,6	213	950	772	1,8	2,4	0,23	0,24

<sup>1</sup> trgovačke oznake tehničkih parafina tvornice RUBITHERM GmbH

### 5.1.2 Neparafinski organski spojevi

Najčešće korišteni neparafinski organski spojevi kao radne tvari za spremanje toplinske energije u latentnim spremnicima su zasićene alifatske monokarboksilne kiseline (masne kiseline). Masne kiseline su organski spojevi karakterizirani s općom formulom  $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ . Njihove su



osnovne prednosti sposobnost reproduktivnog taljenja i skrućivanja s malim iznosom ili bez pothlađivanja. Osnovni je nedostatak masnih kiselina, a time i razlog rijetkog korištenja u latentnim spremnicima, njihova velika cijena u odnosu na tehničke vrste parafina.

Tablica 2. Fizikalna svojstva masnih kiselina kao akumulatora topline [49]

Radna tvar	Temperatura taljenja °C	Specifična i volumna toplina taljenja		Gustoća kapljevit faza		Koeficijent vodljivosti topline kapljevit faza W/(mK)
		kJ/kg	kJ/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	kg/dm <sup>3</sup>	
Kaprilna kiselina	16,5	149	128	0,862	0,148	
Kaprijska kiselina	31,5	153	136	0,886	0,149	
Laurinska kiselina	42 - 44	178	155	0,870	0,147	
Miristinska kiselina	54	187	158	0,844	-	
Palmitinska kiselina	63	187	159	0,847	0,165	
Stearinska kiselina	70	203	191	0,941	0,172	

### 5.1.3 Hidrati soli

Hidrati soli karakterizirani s  $M \cdot nH_2O$ , gdje je s M definiran anorganski spoj, predstavljaju važnu skupinu akumulatora topline u spremnicima latentne topline zbog velike volumne gustoće spremanja topline.

Tablica 3. Fizikalna svojstva hidrata soli kao akumulatora topline [49]

Radna tvar	Temperatura taljenja °C	Specifična i volumna toplina taljenja		Gustoća		Koeficijent vodljivosti topline	
		kJ/kg	kJ/dm <sup>3</sup>	kruta faza kg/dm <sup>3</sup>	kapljevit faza kg/dm <sup>3</sup>	kruta faza W/(mK)	kapljevit faza W/(mK)
KF · 4H <sub>2</sub> O	18,5	231	336	1,455	1,447	-	-
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	29,7	171	256	1,170	1,496	-	-
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	32,4	254	377	1,485	-	-	-
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	35	281	405	1,520	1,442	0,514	0,476
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	36,4	147	304	2,065	-	-	-
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	48	201	322	1,730	1,670	-	-
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	116	165	239	1,570	-	-	-

Osnovni je problem pri korištenju hidrata soli kao akumulatora topline u latentnim spremnicima činjenica da prilikom taljenja nastaje zasićena vodenasta faza i kruta faza koja je općenito hidrat nižeg reda promatrane soli. Zbog razlika u gustoći kruta se faza izdvaja i sakuplja na dnu spremnika te dolazi do dekompozicije radne tvari. Ova je pojava ireverzibilna tj. za vrijeme skrućivanja kruta se faza ne spaja sa zasićenom otopinom u prvobitni hidrat soli. Drugi su važan

problem pri korištenju hidrata soli njihova loša nukleacijska svojstva tj. loša sposobnost stvaranja kristala što rezultira pothlađivanjem kapljevit faze prije nego što dođe do njenog skrućivanja. Ovi se problemi mogu riješiti ili dovoljno smanjiti korištenjem posebnih mjera.

Jedna je od preporučenih mjera dodavanje zamjenskih tvari odnosno zgrušavajućih sredstava u hidrat soli u svrhu sprečavanja odvajanja krute i kapljevit faze te taloženja krute faze na dnu spremnika. Dodavanjem ovih sredstava dolazi do smanjenja volumnog toplinskog kapaciteta spremnika budući da ona zauzimaju manji dio volumena spremnika. Također, ona mogu uzrokovati snižavanje temperature taljenja akumulatora topline. U tablici 4 prikazane su neke od zamjenskih tvari koje se preporučuju za dodavanje različitim hidratima soli.

Tablica 4. Zamjenska sredstva za upotrebu s anorganskim hidratima soli [49]

Akumulatori topline	Zamjenske tvari
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	Hidroksietil celuloza
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 4H <sub>2</sub> O	Poliakrilna kiselina
NaCO <sub>3</sub> · 10H <sub>2</sub> O	Polietilen oksid
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> · 12H <sub>2</sub> O	škrob
Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5H <sub>2</sub> O	drveno vlakno
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	glina

Druga je mjera dodavanje određenih nukleacijskih posrednika, tj. sredstava koja potpomažu skrućivanje radne tvari a imaju kristalnu strukturu sličnu onoj akumulatora topline. Oni služe kao jezgre za rast kristala akumulatora topline za vrijeme procesa skrućivanja i nazivaju se "klicama kristalizacije". U tablici 5 su navedeni neki od preporučenih nukleacijskih posrednika za dodavanje različitim hidratima soli u svrhu smanjenja stupnja pothlađivanja za vrijeme procesa skrućivanja.

Tablica 5. Nukleacijski posrednici za dodavanje anorganskim hidratima soli [49]

Akumulator topline	Nukleacijski posrednik	Stupanj pothlađivanja	
		Bez posrednika °C	S posrednikom °C
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	BaCO <sub>3</sub> , SrCO <sub>3</sub> , BaF <sub>2</sub> , SrF <sub>2</sub>	10 - 14	3 - 5
LiClO <sub>3</sub> · 3H <sub>2</sub> O	KClO <sub>4</sub> , Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , K <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> , BaSiF <sub>6</sub>	2 - 8	0,5
KF · 4H <sub>2</sub> O	kamen plavac	15 - 24	9,5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	boraks	14	2 - 5
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	ZnO, Zn(OH) <sub>2</sub>	2 - 7	1 - 6
KF · 2H <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25 - 35	5 - 8

Jedan od postupaka sprečavanja odvajanja faza pri nekongruentnom taljenju hidrata soli je pretvaranje tog nekongruentnog u kongruentni sustav što se postiže kemijskom modifikacijom sustava. Na primjer, u sustavima sa CaCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O kao akumulatorom topline, nekongruentnim taljenjem nastaje tetrahidrat tj. CaCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O. Ukoliko se u ovaj sustav doda SrCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O postiže se kongruentno taljenje, tj. osigurava se da tetrahidrat ne egzistira u stabilnom stanju. Dodavanjem

$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  smanjuje se topivost  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , a povećava topivost  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Ukoliko je dodatak  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dovoljno velik (oko 2% težinskih udjela) tada se maksimalna točka taljenja  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  poklapa s ravnotežnom točkom između heksahidrata, tetrahidrata i otopine. Taljenjem se ovako modificiranog hidrata soli, peritektička točka zaobilazi i sprečava se formiranje hidrata soli nižeg reda, tj. u ovom slučaju  $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ .

#### 5.1.4 Eutektici

Kao akumulatori topline koriste se i eutektički sastavi smjesa organskih ili anorganskih spojeva jer se pri tom sastavu smjesa tali kod konstantne temperature. Kod svih se ostalih sastava smjese taljenje odnosno skućivanje odvija unutar određenog temperaturnog intervala, tj. između solidus i liquidus linije. Neki od eutektika s prihvatljivim vrijednostima toplina taljenja prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Fizikalna svojstva nekih eutektika koji su u primjeni kao akumulatori topline [49]

Radna tvar	Radna tvar		Temperatura taljenja °C	Specifična toplina taljenja kJ/kg
	(maseni udjeli pojedinih spojeva)	(molni udjeli pojedinih spojeva)		
$\text{Na}_2\text{SO}_4$ $\text{NaCl}$ $\text{KCl}$ $\text{H}_2\text{O}$	(31%) (13%) (16%) (40%)		4	234
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	(67%) (33%)		30	136
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		(53%) (47%)	59,1	144
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$		(53%) (47%)	61	148
$\text{LiNO}_3$ $\text{NH}_4\text{NO}_3$ $\text{NH}_4\text{Cl}$		(27%) (68%) (5%)	81,6	111

#### 5.1.5 Kompatibilnost radnih tvari sa konstrukcijskim materijalima spremnika

Prilikom odabira radnih tvari za spremanje toplinske energije vrlo je važno poznavanje njihova utjecaja na konvencionalne konstrukcijske materijale. Rezultati istraživanja korozivnosti nekih od akumulatora topline u odnosu na neke od konstrukcijskih metala prikazani su u tablici 7.

Tablica 7. Utjecaj korozije akumulatora topline na konvencionalne konstrukcijske materijale spremnika [49]

Radna tvar	Temperatura taljenja °C	Dozvoljeni konstrukcijski materijali
Organska tvar		
Laurinska kiselina	44	nehrđajući čelik, bakar, aluminij i aluminijske legure
Anorganski hidrati soli		
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	29,7	nehrđajući čelik, bakar
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	32,4	nehrđajući čelik, bakar, aluminijska legura
$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	35	nehrđajući čelik, bakar
$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	36,4	nehrđajući čelik, bakar
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	48	nehrđajući čelik, aluminij
Eutektik		
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (molni udio 53%) $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (molni udio 47%)	59,1	nehrđajući čelik

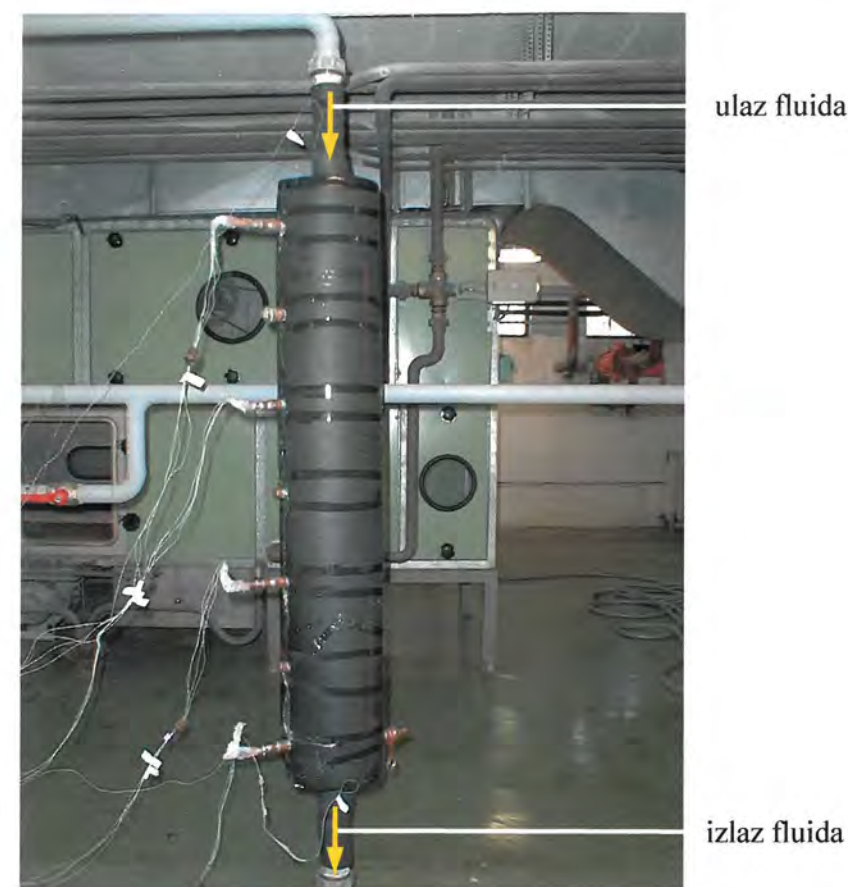
Organske su radne tvari za spremanje toplinske energije kompatibilne s proučavanjem metalima, dok hidrati soli imaju nepovoljan utjecaj na neke konstrukcijske metale. Nehrđajući čelik kompatibilan je sa svim testiranim akumulatorima topline, dok neki od hidrata soli mogu izazvati koroziju bakra odnosno njegovih slitina. Aluminij odnosno aluminijske slitine nekompatibilne su s većinom hidrata soli. Za primjenu u sustavima s hidratima soli kao akumulatorima topline vrlo često se koriste plastični konstrukcijski materijali kao što su polietilen ili polipropilen budući da su kompatibilni s većinom anorganskih hidrata soli i njihovim eutektičkim smjesama.

## 5.2 Opis eksperimentalne naprave

U svrhu provjere postavljenog matematičkog modela proveden je eksperimentalni dio istraživanja. Konstruirana je eksperimentalna naprava za spremanje latentne topline. Naprava je napravljena od dviju koncentričnih cijevi. Unutarnja je cijev bakrena, dimenzija  $d_v = 0,035$  m i  $d_u = 0,033$  m, dok je vanjska cijev napravljena od mesinga i ima dimenzije  $d_v = 0,133$  m i  $d_u = 0,128$  m. Duljina je obiju cijevi 1 m. Vanjska je cijev toplinski izolirana izolacijom pod trgovačkim nazivom *K-FLEX ST H* proizvođača *L'ISOLANTE K-FLEX* da bi se spriječili gubici topline u okoliš. Mjerenje temperatura unutar cijevi vrši se termoparovima *K* tipa. Izmjerene se temperature prikupljaju putem akvizicijskog sustava *Hewlett Packard HP 3852A* i osobnog računala.



Slika 11. Eksperimentalna naprava s akvizicijskim sustavom



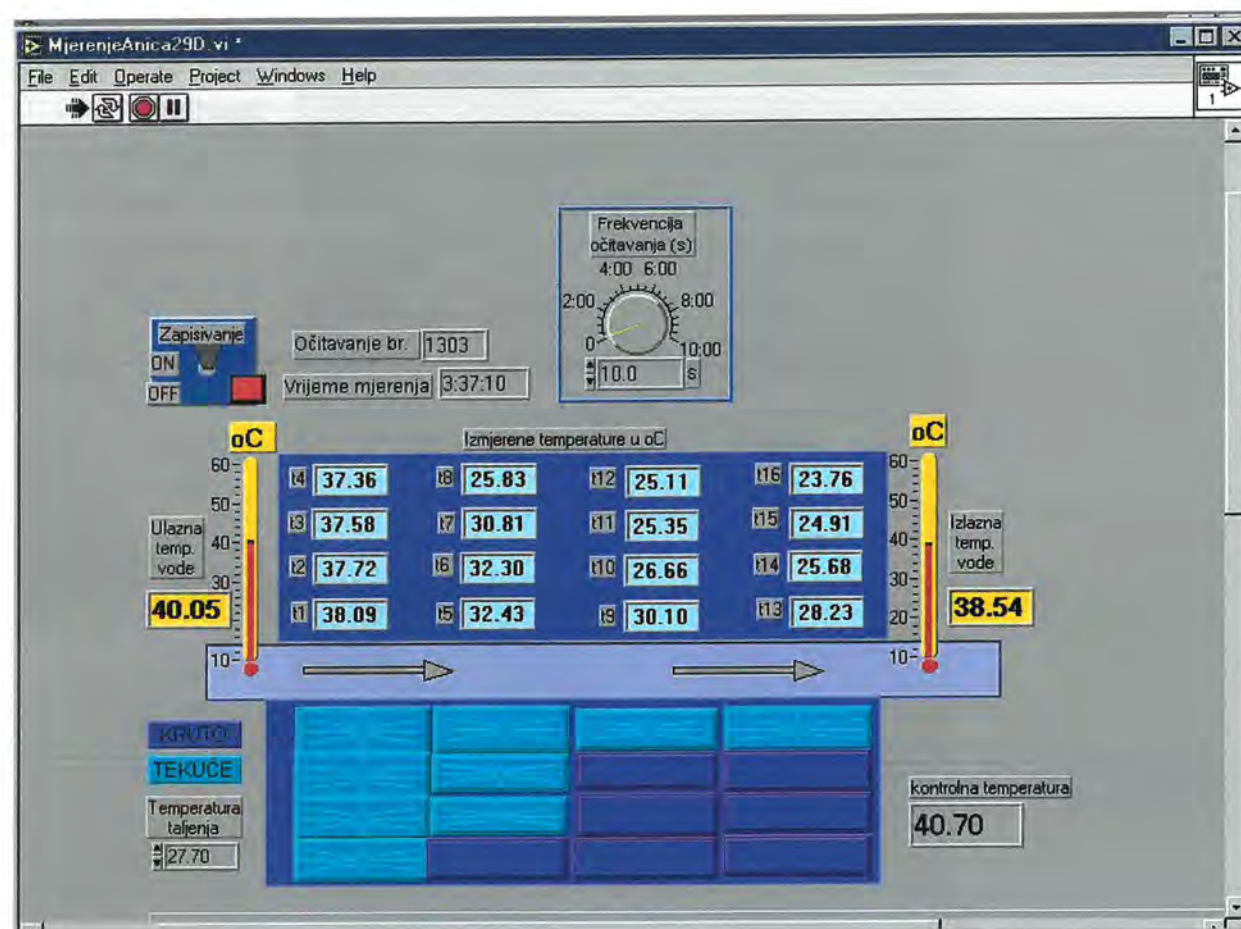
Slika 12. Eksperimentalna naprava

### Sustav za prikupljanje podataka

Svi termoparovi spojeni su na sustav za prikupljanje podataka *Hewlett Packard HP 3852A* s 20 kanalnim relejnim multiplexerom *HP 44708A* s kompenzacijom termoparova. Maksimalni broj očitavanja iznosi 450 kanala u sekundi. Vrijeme stabilizacije sustava iznosi 1 sat. Veza sustava *HP 3852A* i osobnog računala ostvarena je putem *GPIB*-a (General Purpose Interface Bus).

Programiranje akvizicije podataka i prijenos podataka u datoteku vanjske memorije računala ostvareno je korištenjem programskog paketa *LabVIEW* verzija 4.1, proizvođača *National Instruments*. Temperature izmjerene u određenom vremenskom koraku spremaju se u datoteku vanjske memorije računala, a vremensku je promjenu temperatura moguće pratiti i na monitoru računala.

Na sljedećoj je slici prikazan zaslon računala tijekom mjerenja.



Slika 13. Zaslom računala tijekom mjerenja temperature

### 5.3 Analiza greške mjerenja

Valjanost matematičkog (numeričkog) modela utvrđuje se usporedbom numeričkom simulacijom izračunatih i eksperimentalnim postupkom izmjerenih vrijednosti određene fizikalne veličine. Pri tome je potrebno osigurati pouzdanost mjerenih podataka. Bez obzira na kvalitetu mjernih osjetnika i korištene mjerne opreme, svaki se mjerni rezultat doznaje s određenom pogreškom tj. svaki je mjerni rezultat više ili manje nesiguran.

#### 5.3.1 Određivanje mjerne nesigurnosti

Mjerna nesigurnost je brojčani iskaz kvalitete mjernog rezultata.

Izvori nesigurnosti mjernog rezultata mogu biti:

- nepotpuna definicija mjerne veličine,
- nepotpuna realizacija mjernih uvjeta na osnovi kojih bi se trebala odrediti mjerna veličina,
- uzimanje uzorka mjerne veličine nije reprezentativno,
- nedovoljno poznavanje utjecaja vanjskih uvjeta na mjerenu vrijednost,

- netočno očitavanje mjerenih vrijednosti od strane mjeritelja,
- nedovoljno razlučivanje ili osjetljivost mjerila,
- nepreciznost mjerne opreme korištene u mjernoj liniji,
- nepoznata točnost vrijednosti konstanti i drugih veličina preuzetih iz literature,
- aproksimacije i pretpostavke ubačene u proces mjerenja,
- promjene u očitavanju mjerene veličine pod istim uvjetima mjerenja.

Načini određivanja mjerne nesigurnosti mogu se prema [50] podijeliti u dvije osnovne skupine:

- tip A – određivanje statističkim metodama i
- tip B – određivanje ostalim (kombiniranim) metodama.

Mjerna nesigurnost iskazuje se standardnim odstupanjem. Nesigurnost tipa A ( $u_A$ ) određuje se na temelju razdiobe učestalosti (frekvencija) pojedinih očitavanja dobivene ponavljanjem mjerenja. Nesigurnost tipa B ( $u_B$ ) procjenjuje se obično na temelju pretpostavljene razdiobe učestalosti. Ukupna je nesigurnost geometrijski zbroj pojedinih komponenata tj.

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (5.1).$$

Ukoliko postoji više komponenata nesigurnosti, one se geometrijski zbrajaju. Pri tome je važno uočiti da se sve komponente nesigurnosti jednako tretiraju što znatno pojednostavljuje procjenu ukupne nesigurnosti.

Preporučuje se da se kvaliteta mjernog rezultata iskazuje standardnom nesigurnošću, no u opravdanim slučajevima može se iskazati i tzv. proširenom nesigurnošću  $U$ , koja se dobiva množenjem ukupne standardne nesigurnosti s faktorom proširenja  $k$

$$U = k \cdot u \quad (5.2).$$

Veličina faktora proširenja određena je odabranom vjerojatnošću da raspon vrijednosti određen proširenom nesigurnošću obuhvaća vrijednost mjerene veličine. Što je odabrana vrijednost veća, veći je i faktor proširenja. Njegova vrijednost obično iznosi 2 ili 3, što odgovara razini vjerojatnosti oko 95%, odnosno oko 99%.

#### Mjerna nesigurnost tipa A

Mjerna nesigurnost tipa A određuje se metodama deskriptivne statistike tj. statističkom analizom, ponavljanjem mjerenja i računanjem standardnog odstupanja rezultata ponovljenih mjerenja. Najbolja procjena očekivane vrijednosti  $X_i$  dobiva se kao rezultat  $n$  neovisnih opažanja  $X_{i,k}$  u istim uvjetima i zapravo je aritmetička sredina i računa se prema izrazu

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n X_{i,k} \quad (5.3).$$

Standardnom devijacijom (odstupanjem) određeno je rasipanje vrijednosti slobodne varijable  $X_i$  oko aritmetičke sredine:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2} \quad (5.4).$$

Da bi dobili pouzdane ocjene standardne devijacije i općenite valjanosti podataka poželjno je imati rezultate najmanje 20 mjerenja, međutim za manji niz mjerenih podataka definira se standardna devijacija uzorka kao

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (X_{i,k} - \bar{X}_i)^2} \quad (5.5).$$

Standardna devijacija srednje vrijednosti definirana je kao odnos standardne devijacije i korijena broja opažanja:

$$s(\bar{X}_i) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{n}} \quad (5.6).$$

Standardna pogreška  $u(X_i)$  jednaka je standardnoj devijaciji srednje vrijednosti tj.

$$u(X_i) = s(\bar{X}_i) \quad (5.7).$$

Mjerna nesigurnost tipa A iskazuje se standardnom devijacijom srednje vrijednosti tj. standardnom pogreškom

$$u_A(X_i) = s(\bar{X}_i) \quad (5.8).$$

Da bi se dobio što bolji uvid u rasprostiranje slobodne varijable, a i zbog mogućnosti usporedbe dvaju skupova definira se koeficijent varijacije kao omjer standardne devijacije i aritmetičke sredine skupa

$$V(X_i) = \frac{s(X_i)}{\bar{X}_i} \quad (5.9).$$

### Mjerna nesigurnost tipa B

Budući da se pri provođenju mjerenja nikada ne koristi isključivo statistički pristup procjeni pogreške mjerenja, koriste se drugi izvori podataka kojima je opisana mjerna nesigurnost. Zbog ograničenih sredstava, mjerni je rezultat često proizvod samo jednog mjerenja, pa se nesigurnost procjenjuje na temelju informacije kojom raspolažemo. Pridružena nesigurnost  $u(x_i)$  u tom se slučaju procjenjuje iskustvenom prosudbom na temelju svih raspoloživih podataka o ulaznoj

veličini  $X_i$ . Takav je pristup nazvan procjenom mjerne nesigurnosti tipa B i temelji se na različitim izvorima raspoloživih podataka:

- prethodni mjereni podaci
- podaci dostupni iz uputa mjerne opreme i osjetnika
- podaci iz umjernica
- podaci iz priručnika
- podaci temeljeni na procjeni ili iskustvu poznavanja instrumenata.

Mjerna nesigurnost  $u(x_i)$  treba biti znatno manja od granične pogreške  $a$  mjernog uređaja ili mjere

$$u(x_i) \ll a.$$

### Složena mjerna nesigurnost

Obično se pretpostavlja matematički model ovisnosti mjerene veličine o utjecajnim veličinama i pretpostavlja na temelju iskustva vjerojatnosna razdioba nesigurnosti. Tražena mjerna točnost pri tome određuje koje sve veličine treba smatrati utjecajnim na mjerenu veličinu. Ovaj se model treba provjeravati mjerenjima i u njega valja ugraditi nove spoznaje do kojih se dolazi pokusima ili usporedbenim mjerenjima.

Većina se fizikalnih veličina mjeri posredno. Općenito, posredno mjerena fizikalna veličina  $Y$  je funkcija niza međusobno nezavisnih veličina ( $X_1, X_2, \dots, X_n$ ) kojima se vrijednost određuje izravnim mjerenjem

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (5.10).$$

Procijenjena vrijednost mjerene veličine  $Y$  označuje se s  $y$  i dobiva se prema prethodnoj jednadžbi uzimajući u račun procijenjene vrijednosti  $x_1, x_2, \dots, x_n$

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5.11).$$

Svaka od vrijednosti  $x_i$  ima svoju mjernu nesigurnost  $u(x_i)$ .

Pretpostavlja se da je svaka procijenjena ulazna veličina ispravljena za vrijednost poznate sustavne pogreške. Apsolutna nesigurnost mjernog rezultata  $u(y)$  procjenjuje se tada izrazom koji se temelji na aproksimaciji prvim članom Taylorova reda

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)} \quad (5.12).$$

Parcijalne derivacije funkcije po pojedinim ulaznim veličinama zovu se još i koeficijenti osjetljivosti jer pokazuju koliko se mjerni rezultat mijenja ovisno o promjeni određene ulazne veličine  $x_i$ .

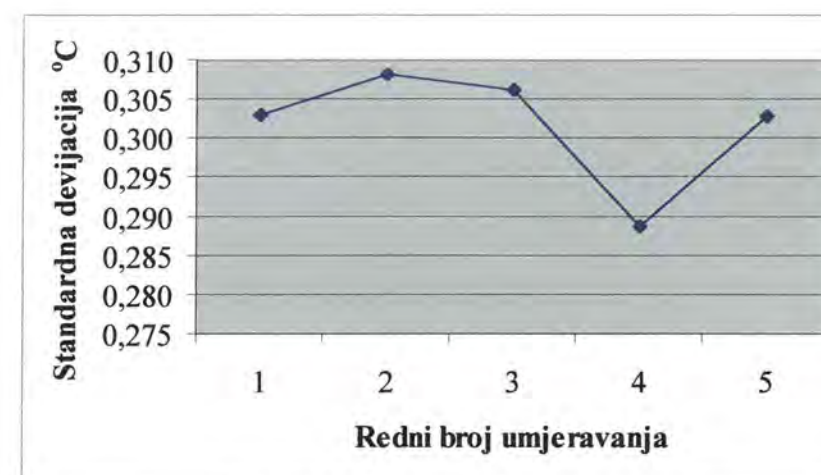
### 5.3.2 Kontrolna mjerenja termoelemenata

Iako su svi termoelementi izrađeni od istog materijala (jedan kolut žice), provedena su kontrolna mjerenja da bi se utvrdila međusobna odstupanja. Umjerenja su provedena u vodenoj kupki s mješalicom pri temperaturama 13, 22,5, 33,2, 39,8 i 47,6 °C u Laboratoriju za toplinska mjerenja Zavoda za tehničku termodinamiku i energetiku Tehničkog fakulteta. Uz 18 korištenih termoelemenata u kupku je uronjen živin termometar točnosti  $\pm 0,05$  °C kao radni etalon temperature. S obzirom da su elektrootpornim zavarivanjem dobiveni spojevi termoelemenata istih dimenzija, pretpostavlja se ista brzina odziva, a kontrolna su mjerenja provedena za stacionarna stanja. Vrijednosti izmjerenih temperatura prilikom umjerenja termoelemenata prikazane su u sljedećoj tablici.

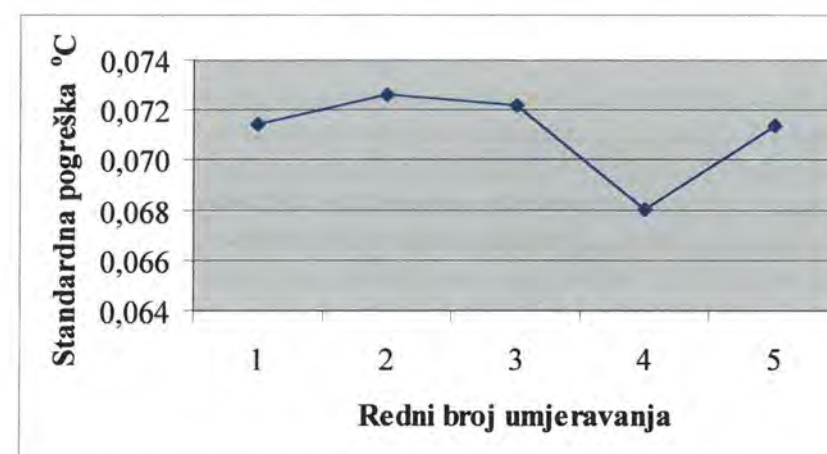
Tablica 8. Umjerenje termoelemenata

Etalon / Termopar	Temperatura °C				
	13,00	22,50	33,20	39,80	47,60
Etalon	13,00	22,50	33,20	39,80	47,60
$\vartheta_{ulaz}$	13,72	23,25	33,92	40,56	48,46
$\vartheta_{izlaz}$	13,94	23,50	34,11	40,76	48,71
$\vartheta_1$	13,39	22,94	33,62	40,23	48,18
$\vartheta_2$	13,23	22,75	33,42	40,09	47,97
$\vartheta_3$	13,15	22,67	33,36	39,98	47,97
$\vartheta_4$	13,14	22,69	33,32	39,98	47,89
$\vartheta_5$	13,22	22,74	33,48	40,10	48,08
$\vartheta_6$	13,20	22,73	33,28	40,03	47,90
$\vartheta_7$	13,23	22,79	33,37	40,04	48,04
$\vartheta_8$	13,23	22,78	33,42	40,05	48,01
$\vartheta_9$	13,26	22,81	33,47	40,11	48,08
$\vartheta_{10}$	13,35	22,86	33,64	40,19	48,12
$\vartheta_{11}$	13,39	22,92	33,60	40,24	48,22
$\vartheta_{12}$	13,71	23,27	33,91	40,53	48,45
$\vartheta_{13}$	13,72	23,20	33,84	40,48	48,38
$\vartheta_{14}$	13,86	23,44	34,11	40,70	48,68
$\vartheta_{15}$	13,89	23,45	34,09	40,71	48,74
$\vartheta_{16}$	13,96	23,48	34,13	40,72	48,73

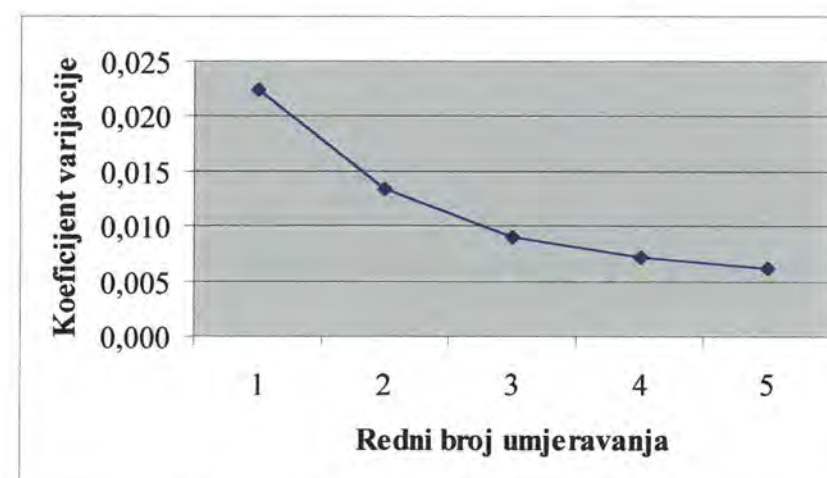
Mjerenja su statistički obradena te su karakteristične statističke veličine prikazane na sljedećim slikama.



Slika 14. Standardna devijacija

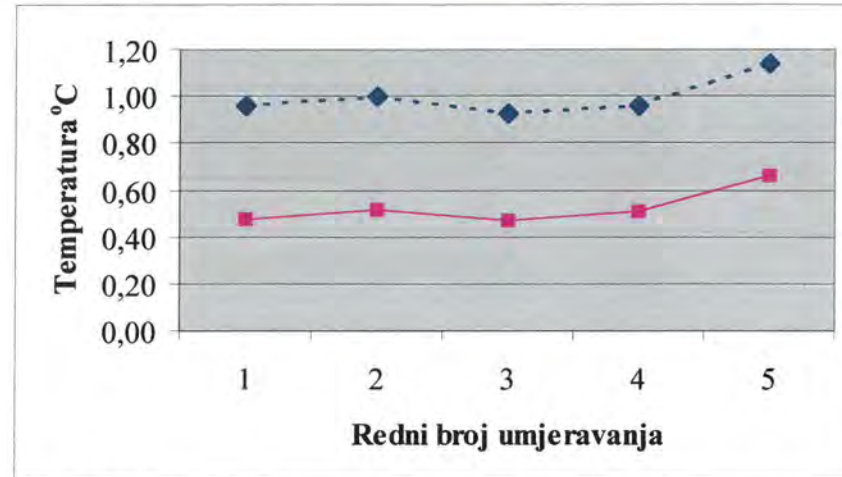


Slika 15. Standardna pogreška



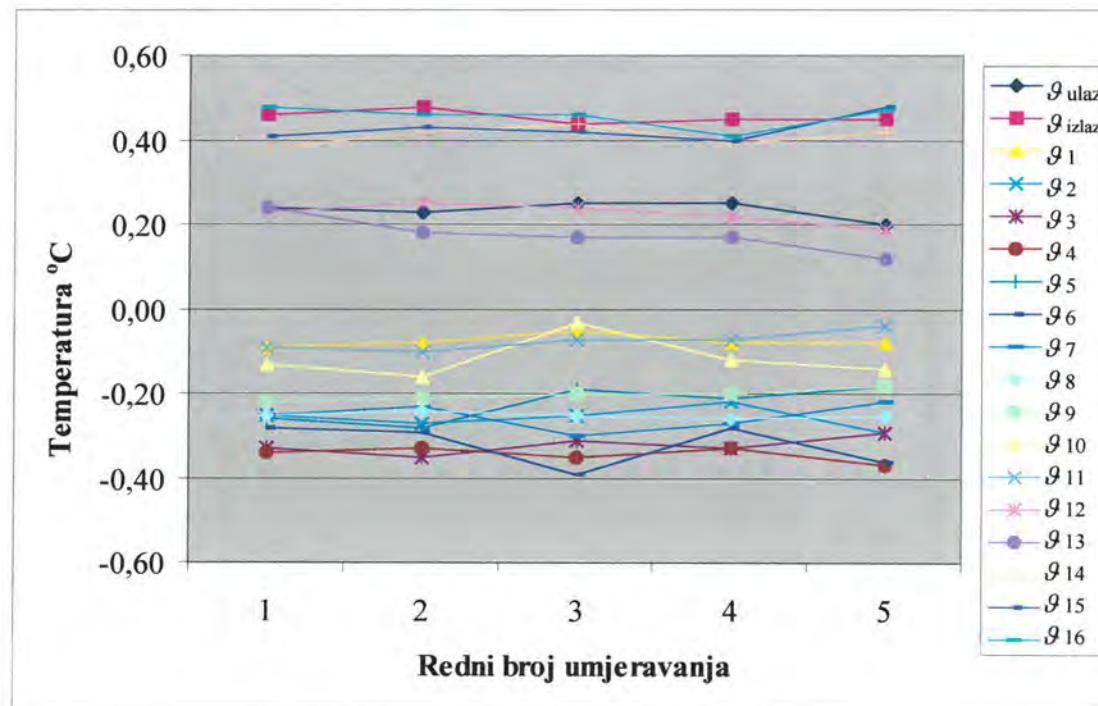
Slika 16. Koeficijent varijacije

Na prethodnim su slikama prikazane standardna devijacija i standardna pogreška koje pri umjeravanju pokazuju isti trend rasta i padanja. Koefficient varijacije opada s porastom temperature umjeravanja što je posljedica udjela širine područja rasipanja temperatura u vrijednosti temperature umjeravanja.

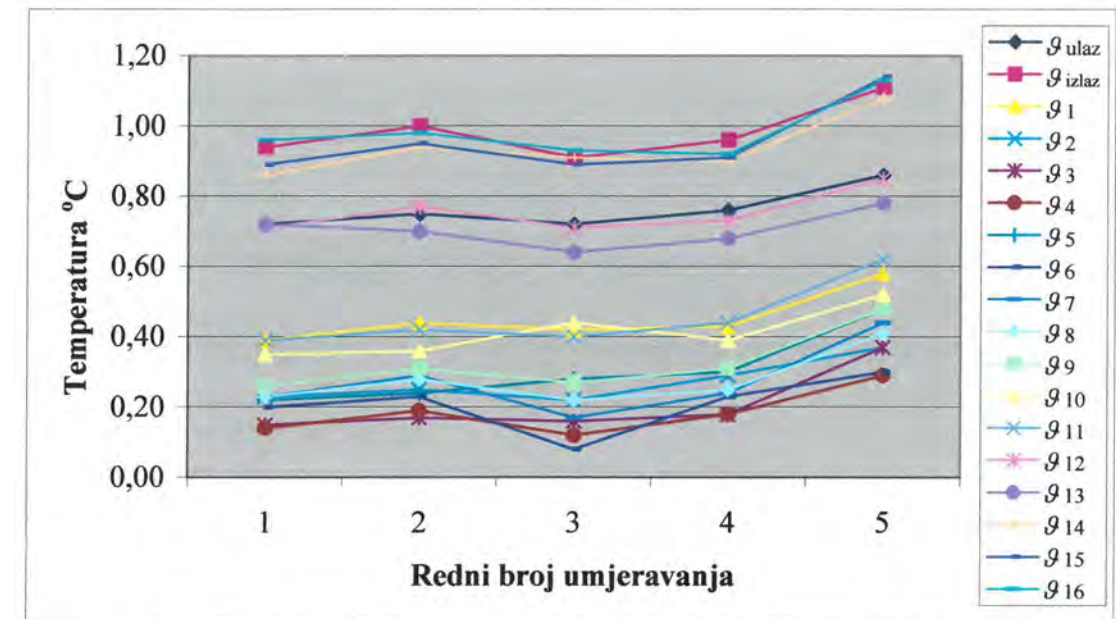


Slika 17. Odstupanja mjerenih temperatura od temperature etalona

Na slici su prikazana odstupanja mjerenih temperatura od temperature etalona pri čemu su crtanim linijom prikazana maksimalna odstupanja pri pojedinim umjeravanjima, dok je punom linijom prikazana vrijednost odstupanja aritmetičke sredine temperatura pri pojedinim umjeravanjima od temperature etalona.



Slika 18. Rasipanje temperatura oko aritmetičke sredine



Slika 19. Odstupanja temperatura u odnosu na temperaturu etalona

Na prethodnim su slikama prikazana odstupanja izmjerenih temperatura od aritmetičke sredine te od temperature etalona. Vidljivo je da se odstupanja izmjerenih temperatura od aritmetičke sredine kreću u rasponu od  $-0,4$  do  $0,5$  °C, dok se odstupanja temperatura od temperature etalona kreću u rasponu od  $0,1$  do maksimalno  $1,15$  °C. Isto tako vidljivo je da se razlika maksimalnog i minimalnog odstupanja od temperature etalona za pojedine termoparove prilikom svih pet umjeravanja kreće u granicama od  $0,15$  do  $0,25$  °C. Odstupanja temperatura svih 18 termoparova u odnosu na temperaturu etalona unesena su u sustav za prikupljanje podataka kao korekcijska vrijednost očitavanja temperature.

Mjerna nesigurnost provedenih umjeravanja termoelemenata može se izračunati na sljedeći način. Sustavna se greška (mjerna nesigurnost) računa kao

$$u_s = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2}$$

gdje je

$u_{s1}$  - najveće odstupanje izmjerene temperature od temperature etalona, te iznosi  $u_{s1} = 1,14$  °C,

$u_{s2}$  - mjerna nesigurnost zbog utjecaja zračenja, nestacionarnosti itd., a procijenjuje se na  $0,5\%$  mjerene temperature, pa iznosi  $u_{s2} = 0,24$  °C

te slijedi

$$u_s = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2} = \sqrt{1,14^2 + 0,24^2} = 1,165$$
 °C.

Slučajna se greška (mjerna nesigurnost) računa kao

$$u_n = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2}$$

gdje je

$u_{n1}$  - mjerna nesigurnost zbog rasipanja mjerenih vrijednosti definirana standardnom pogreškom, te iznosi  $u_{n1} = 0,073^\circ\text{C}$ ,

$u_{n2}$  - mjerna nesigurnost etalona, procijenjena na  $\frac{1}{2}$  osnovne podjele na mjernoj skali te iznosi  $u_{n2} = 0,05^\circ\text{C}$

pa slijedi

$$u_n = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2} = \sqrt{0,073^2 + 0,05^2} = 0,089^\circ\text{C}.$$

Ukupna nesigurnost mjerenja temperature termolemenata iznosi:

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_n^2} = \sqrt{1,165^2 + 0,089^2} = 1,17^\circ\text{C}.$$

Nakon što su odstupanja temperatura svih termoparova u odnosu na temperaturu etalona unesena su u sustav za prikupljanje podataka kao korekcijska vrijednost očitavanja temperature dobivene su sljedeće vrijednosti mjerne nesigurnosti.

Najveće odstupanje izmjerene temperature od temperature etalona iznosi  $u_{s1} = 0,13^\circ\text{C}$ , a mjerna nesigurnost zbog utjecaja zračenja, nestacionarnosti itd.  $u_{s2} = 0,24^\circ\text{C}$ , pa sustavna greška iznosi

$$u_s = \sqrt{u_{s1}^2 + u_{s2}^2} = \sqrt{0,13^2 + 0,24^2} = 0,273^\circ\text{C}.$$

Mjerna nesigurnost zbog rasipanja mjerenih vrijednosti definirana standardnom pogreškom iznosi  $u_{n1} = 0,007^\circ\text{C}$ , a mjerna nesigurnost etalona  $u_{n2} = 0,05^\circ\text{C}$  pa slučajna greška iznosi

$$u_n = \sqrt{u_{n1}^2 + u_{n2}^2} = \sqrt{0,007^2 + 0,05^2} = 0,05^\circ\text{C}.$$

Ukupna nesigurnost mjerenja temperature termolemenata iznosi:

$$u = \sqrt{u_s^2 + u_n^2} = \sqrt{0,273^2 + 0,05^2} = 0,28^\circ\text{C}.$$

## 5.4 Opis izvršenog mjerenja

U ovom je mjerenju kao fluid korištena voda koja pogonjena pumpom cirkulira između dvaju spremnika (toplog i hladnog) te struji kroz unutarnju cijev dvocijevnog izmjenjivača topline. Protok vode kroz cijev je konstantan i mjeri se mjeracem protoka. Temperatura vode na ulazu u cijev održavana je konstantnom grijačem unutar spremnika vode. Vanjska je cijev ispunjena akumulatorom topline. Kao akumulator topline korišten je parafin pod trgovačkim nazivom RUBITHERM RT 30 njemačke tvornice RUBITHERM GmbH sa sljedećim fizikalnim svojstvima:

- temperatura taljenja	$T_m = 300,7 \text{ K}$ ,
- specifična toplina taljenja	$q = 206 \text{ kJ/kg}$ ,
- koeficijent vodljivosti topline	
kruta faza	$\lambda_s = 0,18 \text{ W/(mK)}$ ,
kapljevita faza	$\lambda_L = 0,19 \text{ W/(mK)}$ ,
- specifični toplinski kapacitet	
kruta faza	$c_s = 1,8 \text{ kJ/(kgK)}$ ,
kapljevita faza	$c_L = 2,4 \text{ kJ/(kgK)}$ ,
- gustoća	
kruta faza	$\rho_s = 789 \text{ kg/m}^3$ ,
kapljevita faza	$\rho_L = 750 \text{ kg/m}^3$ .

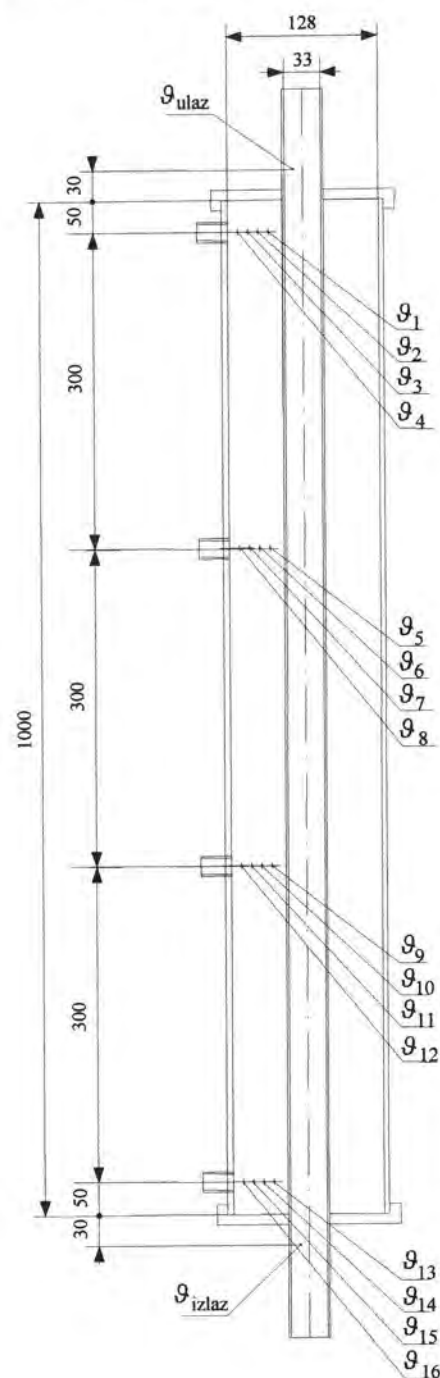
U ovoj su analizi kao fluid i akumulator topline korišteni voda i parafin budući da se vrlo često koriste u inženjerskim aplikacijama. Mjerenja temperatura izvršena su primjenom NiCr-Ni termoparova (K tip) koji su unutar cijevi s akumulatorom topline smješteni u radialnom smjeru na različitim duljinama cijevi. Unutar akumulatora topline smješteno je ukupno 16 termoparova, po četiri duž radijusa cijevi na svakoj od četiri različite duljine. Termoparovi su učvršćeni pričvršćivanjem na tanku drvenu šipku. Postavljena su i dva termopara unutar fluida tj. na ulazu i izlazu vode iz unutarnje cijevi. Svi su termoparovi spojeni na sustav za akviziciju podataka. Da bi se smanjio utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitom fazi akumulatora topline tj. da bi se osiguralo osnosimetrično taljenje oko unutarnje cijevi spremnika, eksperimentalna je naprava postavljena vertikalno.

Početno je akumulator topline u krutoj fazi te slijedi proces spremanja topline pri čemu dolazi do taljenja akumulatora topline. Početni se uvjeti postavljaju cirkulacijom vode iz hladnog spremnika pri temperaturi okoliša. Početni su uvjeti postavljeni kada svi termoparovi koji mjere temperaturu akumulatora topline pokazuju istu temperaturu. U tom se trenutku voda brzo ispušta iz cijevi. Uspostavlja se cirkulacija vode iz toplog spremnika zadane temperature, pri čemu su zadani protok i ulazna temperatura vode u model latentnog spremnika, te počinje mjerenje podataka. Temperature se sa svih termoparova, koji su smješteni unutar akumulatora topline te unutar vode na ulazu i na izlazu iz cijevi, očitavaju u zadanim vremenskim periodima te bilježe u datoteku memorije računala. Eksperiment procesa taljenja završen je kada svi termoparovi postignu istu temperaturu koja je približno jednaka temperaturi vode.

Po završetku eksperimenta procesa taljenja odnosno po završetku procesa ustaljivanja temperatura unutar vanjske cijevi, čime su uspostavljeni početni uvjeti, moguće je provesti



eksperiment procesa skrućivanja. Uspostavlja se cirkulacija vode iz hladnog spremnika pri čemu je zadan protok i ulazna temperatura vode u model latentnog spremnika. Slijedi mjerenje i bilježenje izmjerenih temperatura vode i parafina u datoteku memorije računala. Eksperiment je završen kada svi termoparovi unutar parafina odnosno akumulatora topline pokazuju istu temperaturu, obično malo iznad ulazne temperature vode.



Slika 20. Smještaj termoparova unutar eksperimentalne naprave

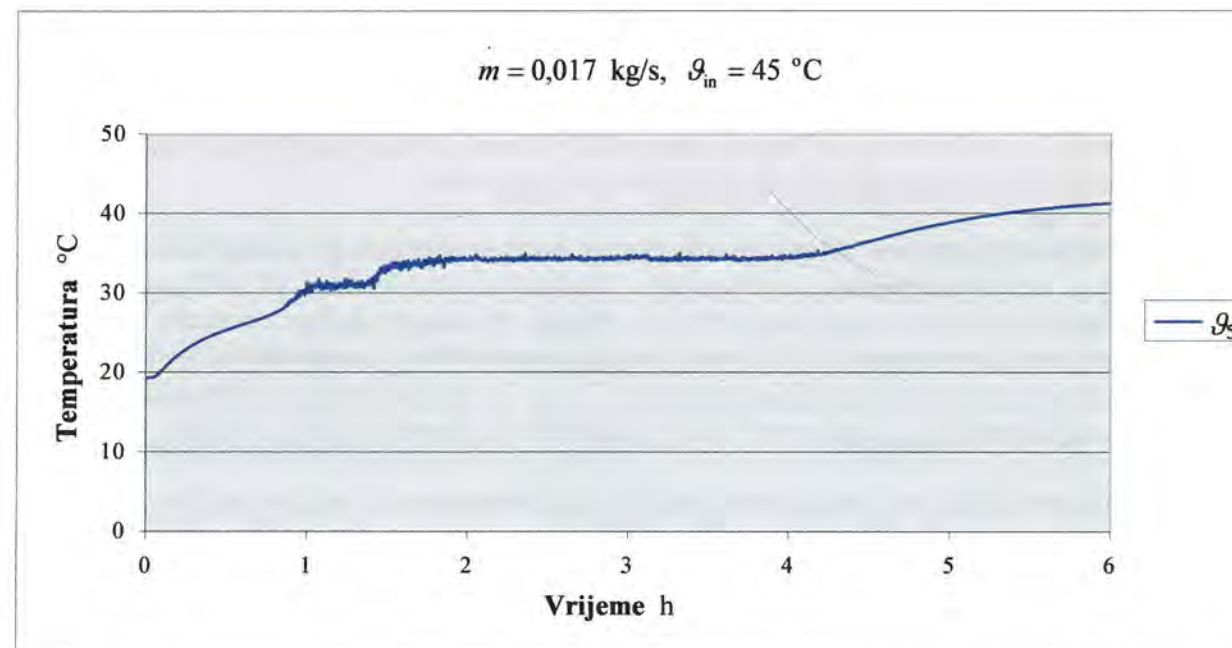
U sklopu predmetnih eksperimentalnih istraživanja izvršen je veći broj eksperimenata taljenja i skrućivanja akumulatora topline odnosno eksperimenata spremanja i korištenja topline iz modela latentnog spremnika. Eksperimenti su vršeni za različite vrijednosti protoka i različite vrijednosti ulaznih temperatura fluida u eksperimentalnu napravu.

#### 5.4.1 Mjerenja pri procesu taljenja akumulatora topline (proces spremanja topline)

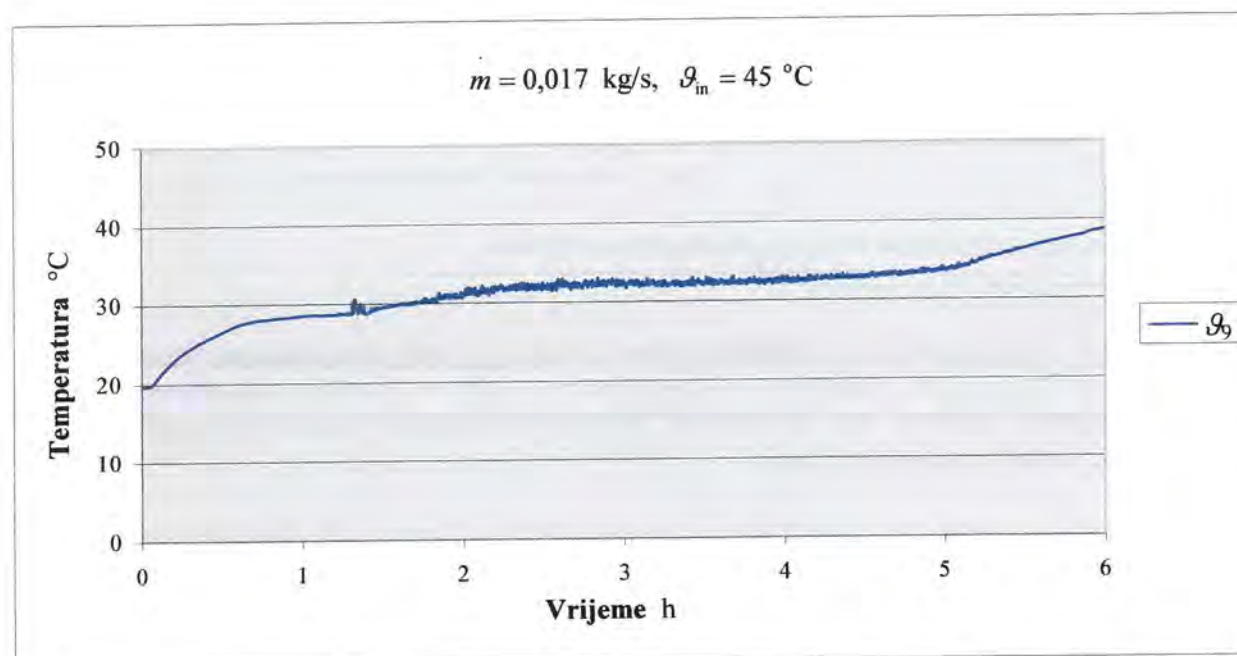
Predmetnim eksperimentalnim istraživanjima izvršen je veći broj eksperimenata taljenja akumulatora topline pri različitim vrijednostima protoka te ulaznih temperatura fluida u eksperimentalnu napravu. Od provedenih su eksperimentalnih istraživanja izdvojena dva mjerenja za različite pogonske uvjete.

Prvo je mjerenje vršeno za slučaj masenog protoka fluida odnosno vode kroz spremnik od 0,017 kg/s. Ulazna temperatura fluida u model latentnog spremnika iznosila je 45 °C i održavana je konstantnom grijačem unutar toplog spremnika. Mjerenje i bilježenje temperatura u datoteku računala u referentnim točkama akumulatora topline vršeno je svakih 10 s. Eksperiment procesa taljenja akumulatora topline vršen je u vremenu od 6 h.

Promjene temperatura akumulatora topline na određenim mjernim mjestima u vremenu prikazane su u sljedećim dijagramima. Kao primjer odabrana su mjerna mjesta 5 ( $x = 0,35$  m i  $r = 0,0265$  m) i 9 ( $x = 0,65$  m i  $r = 0,0265$  m) budući da svi termoparovi unutar akumulatora topline pokazuju sličan tok krivulje promjene temperature s vremenom.



Slika 21. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju

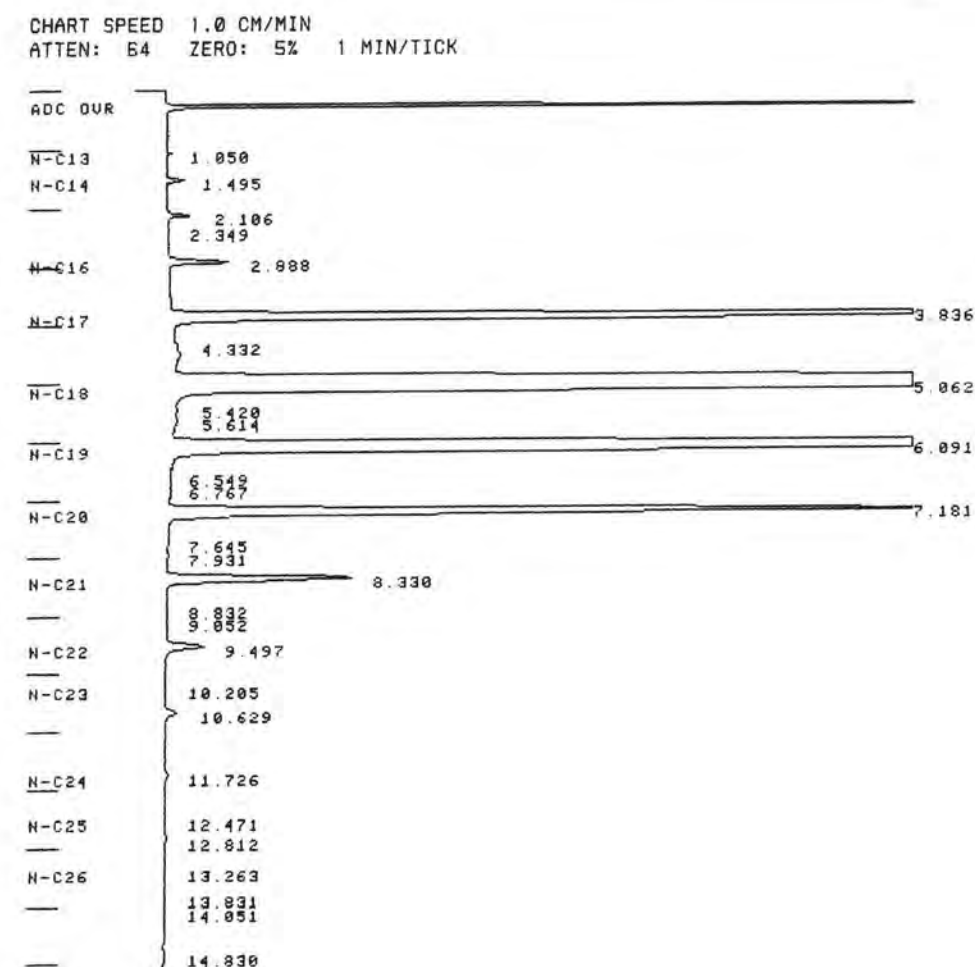


Slika 22. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju

Iz dijagrama je vidljivo da temperatura akumulatora topline koji je početno u krutom agregatnom stanju raste do temperature taljenja akumulatora topline. Za vrijeme taljenja temperatura akumulatora topline ostaje približno konstantna da bi po završetku procesa taljenja temperatura akumulatora topline, koji je sada u kapljevitom agregatnom stanju, ponovno počela brže rasti. Mjerenjima je uočeno da se taljenje parafina ne vrši pri potpuno konstantnoj temperaturi, već u određenom temperaturnom intervalu, tj. za vrijeme procesa taljenja temperatura parafina poraste za nekoliko °C, međutim taj je porast temperature mnogo sporiji od porasta temperature pri zagrijavanju krute i kapljevite faze, što je vidljivo i iz dijagrama.

U svrhu objašnjenja pojave temperaturnog intervala taljenja ispitan je uzorak parafina RT 30 korištenog u eksperimentalnim istraživanjima. Analiza uzorka izvršena je primjenom tehnike plinske kromatografije u Laboratoriju INA-e, Rijeka. Rezultati analize pokazuju da ispitani parafin nije jednokomponentna smjesa već je smjesa zasićenih ugljikovodika sa 13 do 25 atoma ugljika u kojoj prevladavaju ugljikovodici sa 17 do 20 atoma ugljika. Temperatura taljenja zasićenih ugljikovodika tj. alkana raste s povećanjem broja atoma ugljika i za alkane sa 17 do 20 atoma ugljika kreće se od 22 °C do 37 °C, a budući da je korišteni parafin RT 30 smjesa tih ugljikovodika približno se u tom rasponu kreće i njegov temperaturni interval taljenja.

Rezultati dobiveni plinskom kromatografijom prikazani su na sljedećoj slici, a u tablici 9 navedeni su pripadni maseni udjeli i temperature taljenja najzastupljenijih alkana u ispitivanoj parafinskoj smjesi.



Slika 23. Rezultati analize uzorka parafina RT 30 dobiveni tehnikom plinske kromatografije

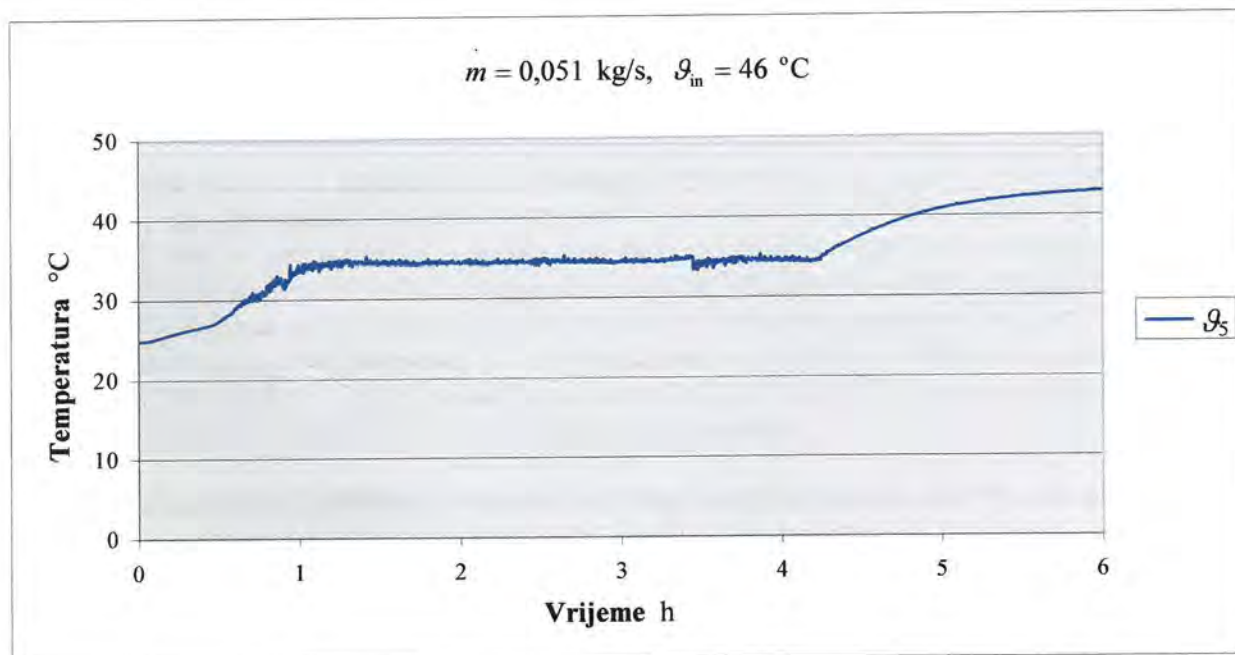
Tablica 9. Maseni udjeli i temperature taljenja najzastupljenijih alkana u parafinskoj smjesi

Zasićeni ugljikovodik (alkan)	Maseni udio %	Temperatura taljenja °C
$C_{17}H_{36}$	7,79	22
$C_{18}H_{38}$	65,36	28,3
$C_{19}H_{40}$	20,14	32
$C_{20}H_{42}$	4,65	37

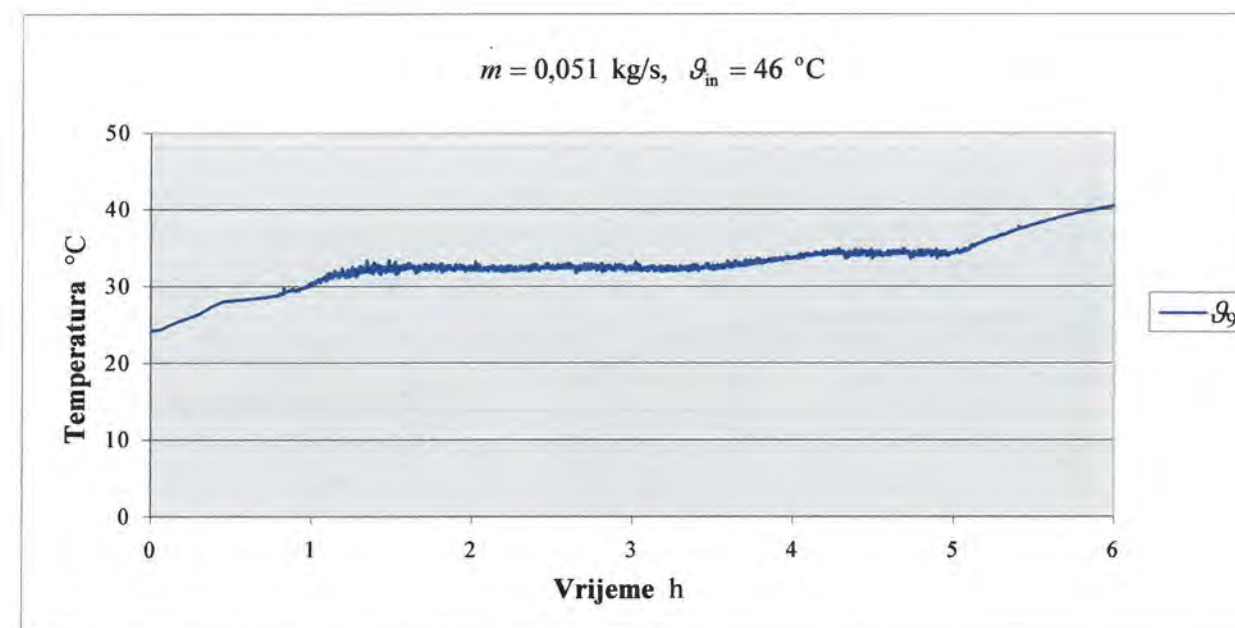
Navedena su opažanja o temperaturnom intervalu taljenja parafina dostupna i iz relevantne literature [49].

Usporedbom toka krivulja akumulatora topline na mjernim mjestima 5 i 9 vidljivo je da proces taljenja na mjernom mjestu 5 počinje prije nego proces taljenja na mjernom mjestu 9, te da proces taljenja u točki 5 završava prije od procesa taljenja u točki 9, što je i logično budući da je mjerno mjesto 5 na manjoj udaljenosti od ulaza tople vode u model latentnog spremnika.

Drugo je mjerenje vršeno za slučaj masenog protoka fluida od 0,051 kg/s. Ulazna temperatura fluida u model latentnog spremnika iznosila je 46 °C. Kao i u prethodnom slučaju mjerenje i bilježenje temperatura u datoteku računala u referentnim točkama akumulatora topline vršeno je svakih 10 s, a eksperiment procesa taljenja akumulatora topline vršen je u vremenu od 6 h. Promjene temperatura akumulatora topline na mjernim mjestima 5 i 9 u vremenu prikazane su u sljedećim dijagramima.



Slika 24. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju



Slika 25. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju

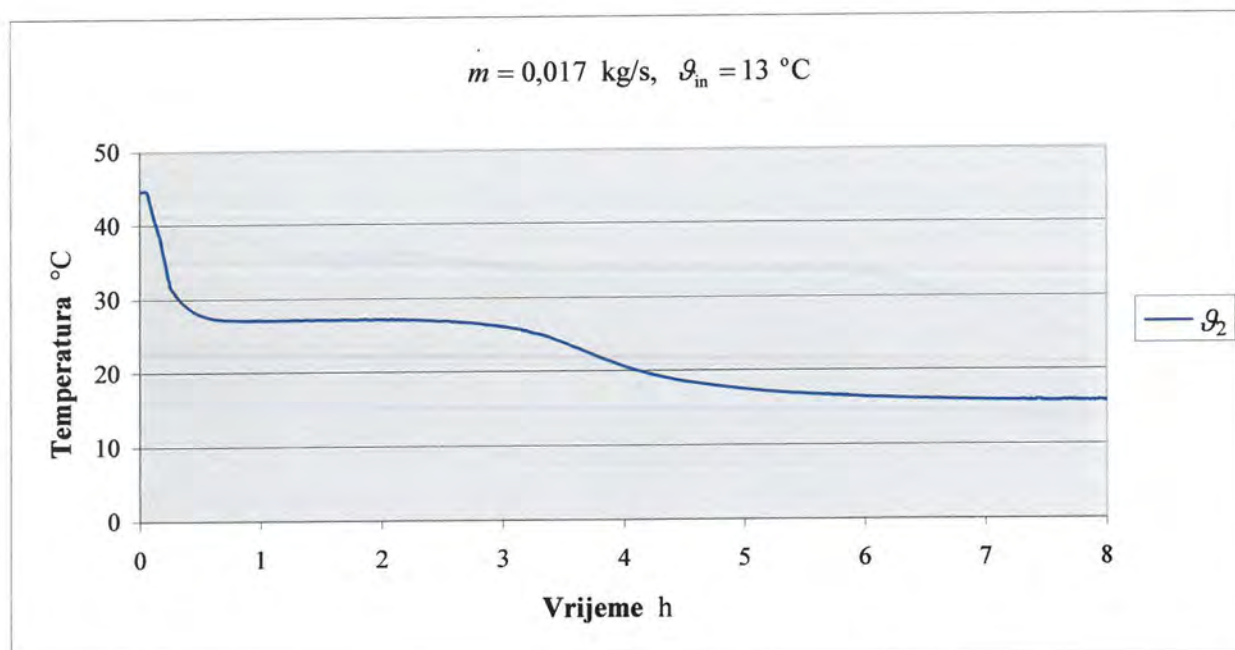
Ovim je eksperimentom dobiven sličan tok krivulja promjene temperature s vremenom kao i u prethodnom slučaju. U oba je promatrana slučaja akumulator topline bio početno u krutoj fazi međutim početne su temperature različite. U prvom je slučaju ona iznosila 293 K, a u drugom 298 K.

#### 5.4.2 Mjerenja pri procesu skrućivanja akumulatora topline (proces korištenja topline)

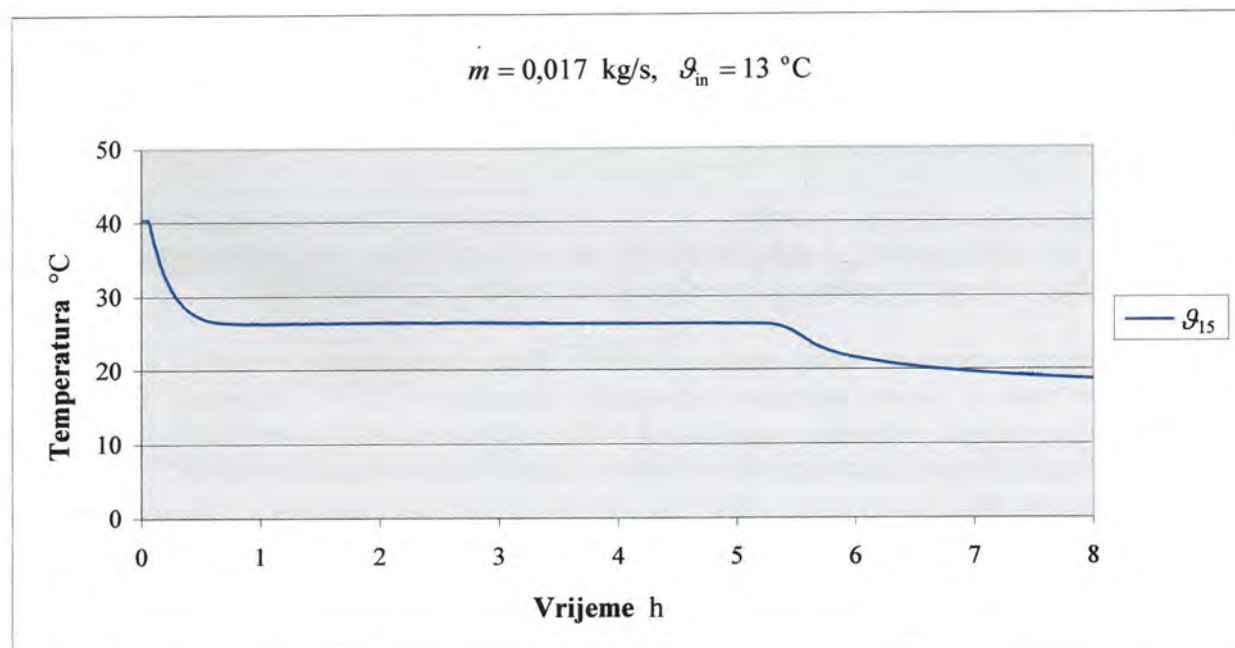
Po završetku procesa taljenja izvršen je veći broj eksperimenata skrućivanja akumulatora topline pri različitim vrijednostima protoka te ulaznih temperatura fluida u eksperimentalnu napravu. Kao i u slučaju taljenja izdvojena su dva mjerenja za različite pogonske uvjete.

Prvo je mjerenje vršeno za slučaj masenog protoka fluida kroz spremnik od 0,017 kg/s. Ulazna temperatura vode u model latentnog spremnika iznosila je 13 °C. Mjerenje i bilježenje temperatura u datoteku računala u referentnim točkama akumulatora topline vršeno je svakih 10 s, a eksperiment procesa skrućivanja akumulatora topline vršen je u vremenu od 8 h.

Promjene temperatura akumulatora topline na određenim mjernim mjestima u vremenu prikazane su u sljedećim dijagramima. Kao primjer odabrana su mjerna mjesta 2 ( $x = 0,05$  m i  $r = 0,0355$  m) i 15 ( $x = 0,95$  m i  $r = 0,0445$  m) budući da svi termoparovi unutar akumulatora topline, kao što je to bio slučaj i kod taljenja, pokazuju sličan tok krivulje promjene temperature s vremenom.



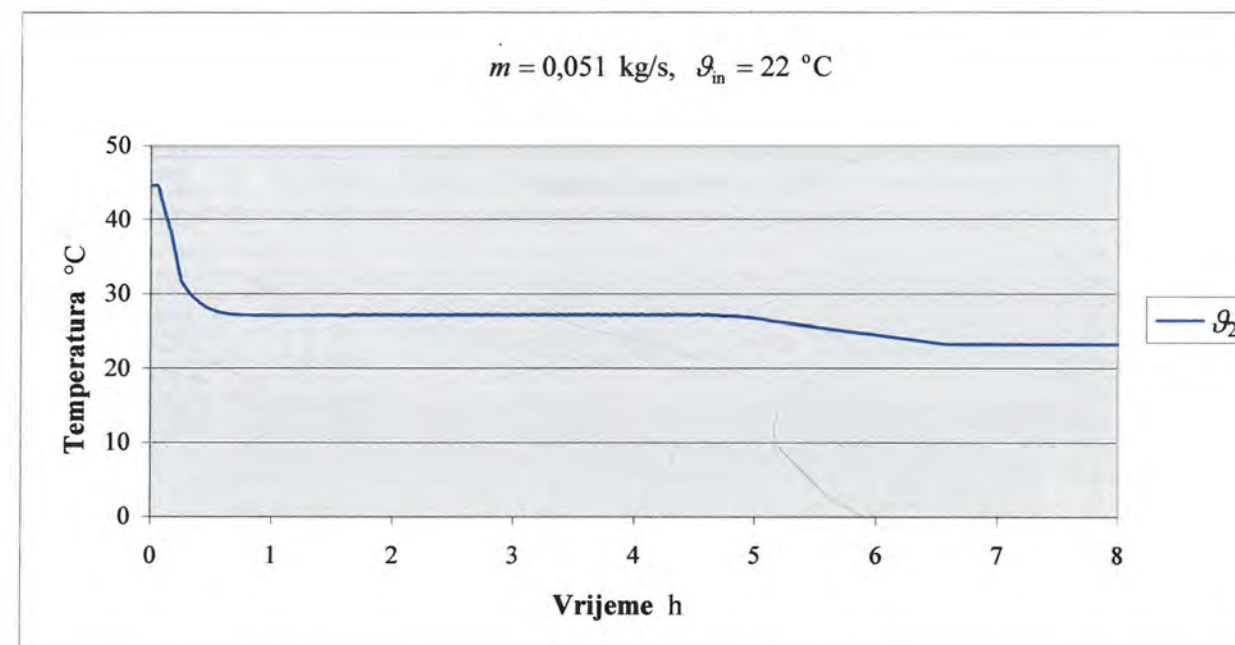
Slika 26. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju



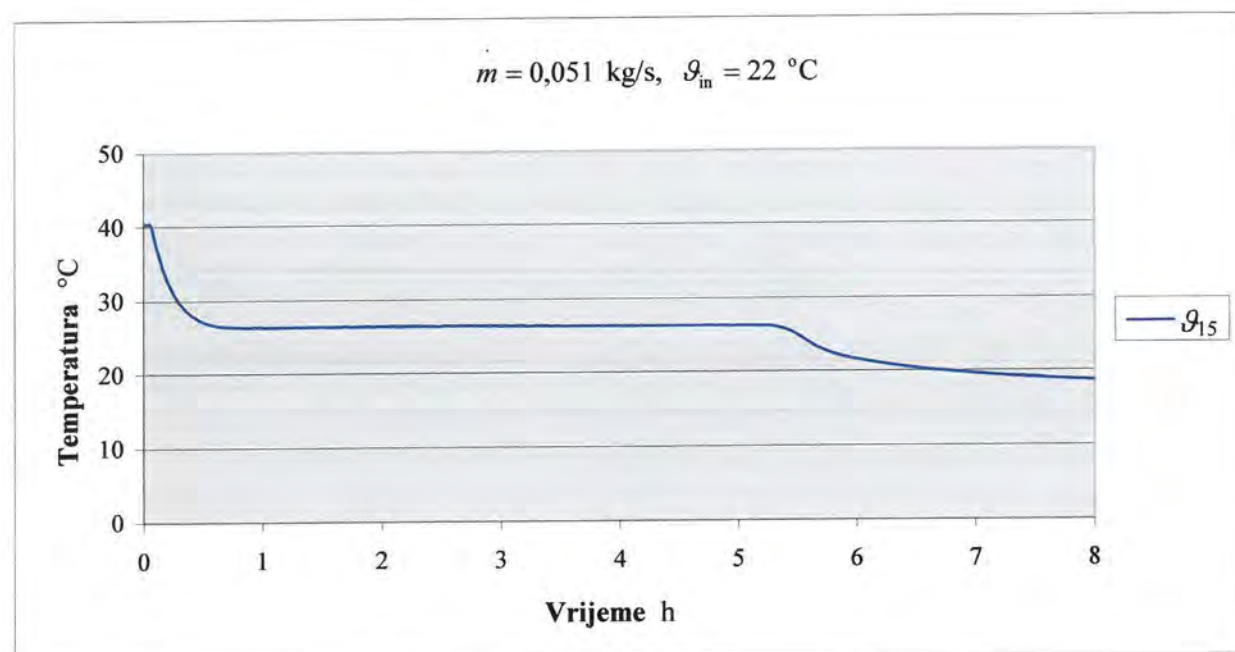
Slika 27. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju

Iz dijagrama je vidljivo da temperatura kapljevito akumulatora topline naglo pada do postizanja temperature skrućivanja, da bi zatim ostala konstantna sve do završetka procesa skrućivanja. Nakon što je parafin potpuno skrutnut daljnjim odvođenjem topline dolazi do snižavanja temperature krutog parafina. Za razliku od procesa taljenja uočeno je da se proces skrućivanja parafina odvija pri konstantnoj temperaturi. Skrućivanje na mjernom mjestu 2 započinje i završava prije od procesa skrućivanja na mjernom mjestu 15 budući da se mjerno mjesto dva nalazi na manjoj udaljenosti od ulaza hladne vode koja preuzima spremljenu toplinu u spremnik.

Postupak skrućivanja akumulatora topline ponovljen je za slučaj masenog protoka fluida od 0,051 kg/s, te ulazne temperature fluida u model latentnog spremnika od 22  $^{\circ}\text{C}$ . I u ovom je slučaju mjerenje i bilježenje temperatura u datoteku računala u referentnim točkama akumulatora topline vršeno svakih 10 s, a eksperiment procesa skrućivanja akumulatora topline vršen je u vremenu od 8 h. Promjene temperatura akumulatora topline na mjernim mjestima 2 i 15 u vremenu imaju sličan tok kao i u prethodnom slučaju što je vidljivo iz sljedećih dijagrama.



Slika 28. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju



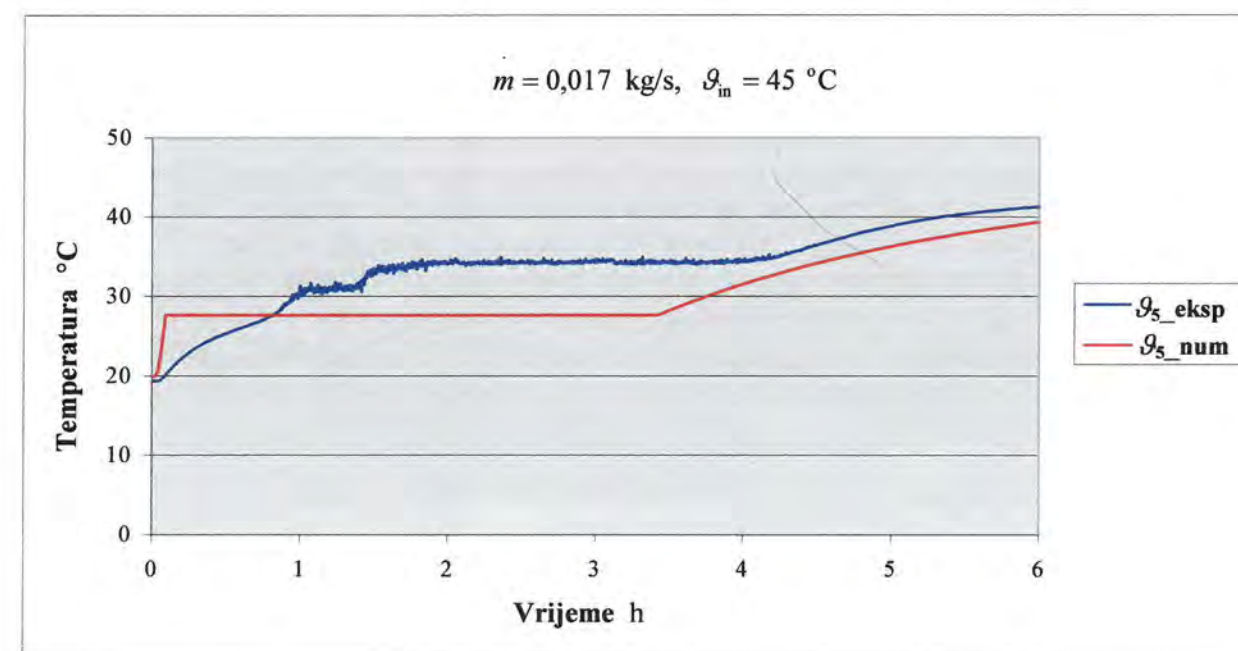
Slika 29. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju

## 6 Primjena numeričke analize na latentni spremnik na kojem su vršena eksperimentalna istraživanja

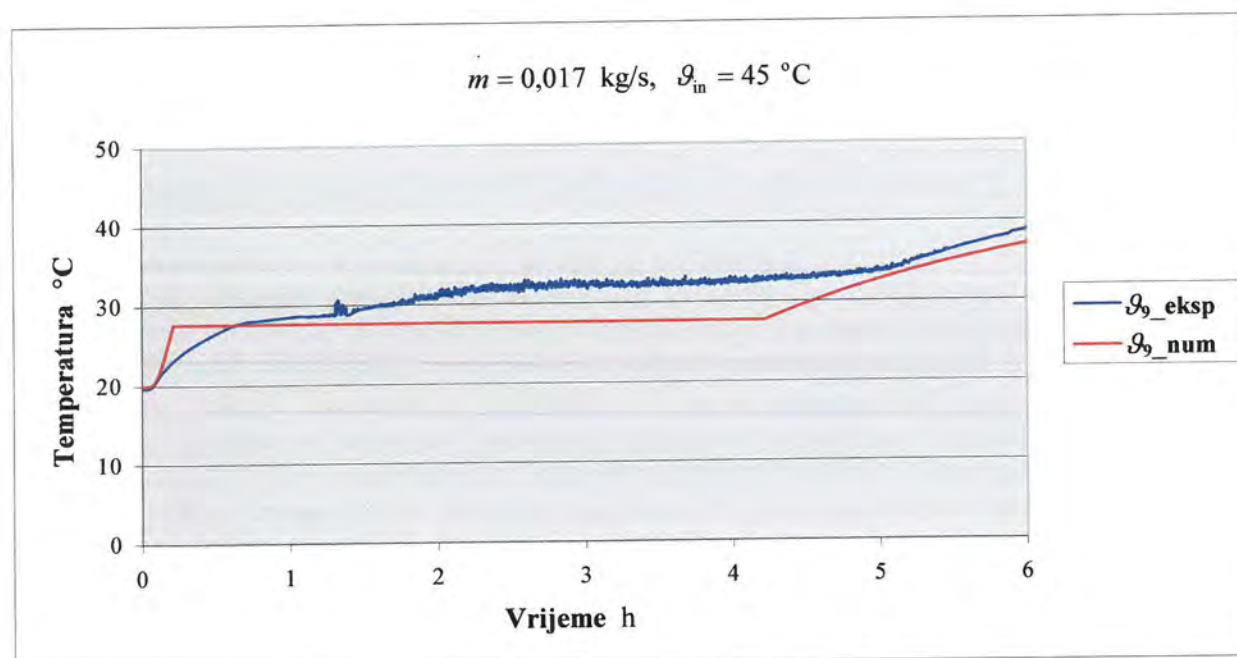
### 6.1 Usporedba rezultata numeričkog i eksperimentalnog istraživanja

U svrhu provjere postavljenog matematičkog modela numerička je analiza primijenjena na segmentni dio tj. model latentnog spremnika na kojem su vršena eksperimentalna istraživanja. U razvijeni su kompjuterski program uneseni konstrukcijski parametri tj. dimenzije eksperimentalne naprave, podaci o fizikalnim svojstvima fluida, stijenke cijevi i fizikalnim svojstvima korištenog akumulatora topline, tj. parafina, koje je deklarirao proizvođač. Točnost postavljenog matematičkog modela i razvijenog računalnog programa provjerena je usporedbom rezultata numeričkog proračuna i rezultata mjerenja za različite pogonske uvjete modela latentnog spremnika. U nastavku je dana usporedba dobivenih rezultata za dva mjerenja prilikom taljenja, tj. spremanja topline i dva mjerenja prilikom skrućivanja, tj. korištenja topline iz spremnika, prikazana u prethodnom poglavlju. Numerička je simulacija izvršena za mrežu kontrolnih volumena s 250 čvorova u aksijalnom smjeru i 73 čvorova u radialnom smjeru čime je obuhvaćen fluid, stijenka cijevi i akumulator topline, te za vremenski korak od 0,1 s.

Računalnim je programom najprije obrađen slučaj taljenja akumulatora topline. U prvom je primjeru maseni protok fluida iznosio 0,017 kg/s, a njegova ulazna temperatura u model spremnika 45 °C. Vrijeme trajanja procesa spremanja topline iznosilo je 6 h. Usporedba dobivenih rezultata s rezultatima eksperimenta prikazana je u sljedećim dijagramima.

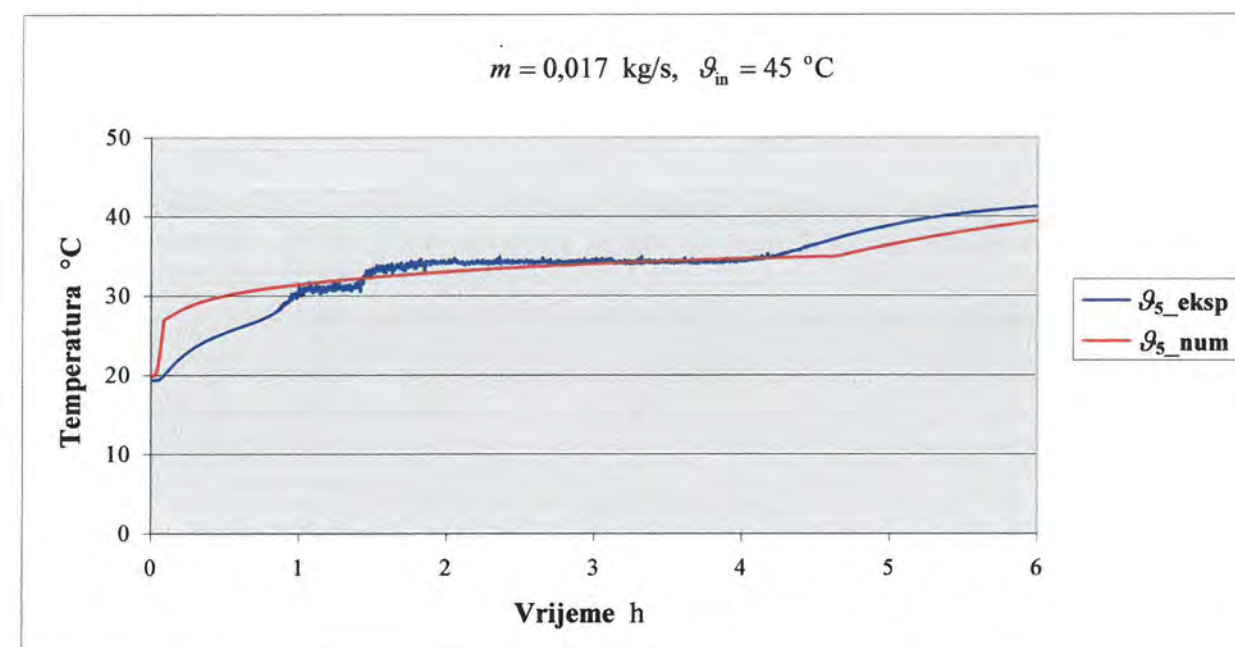


Slika 30. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

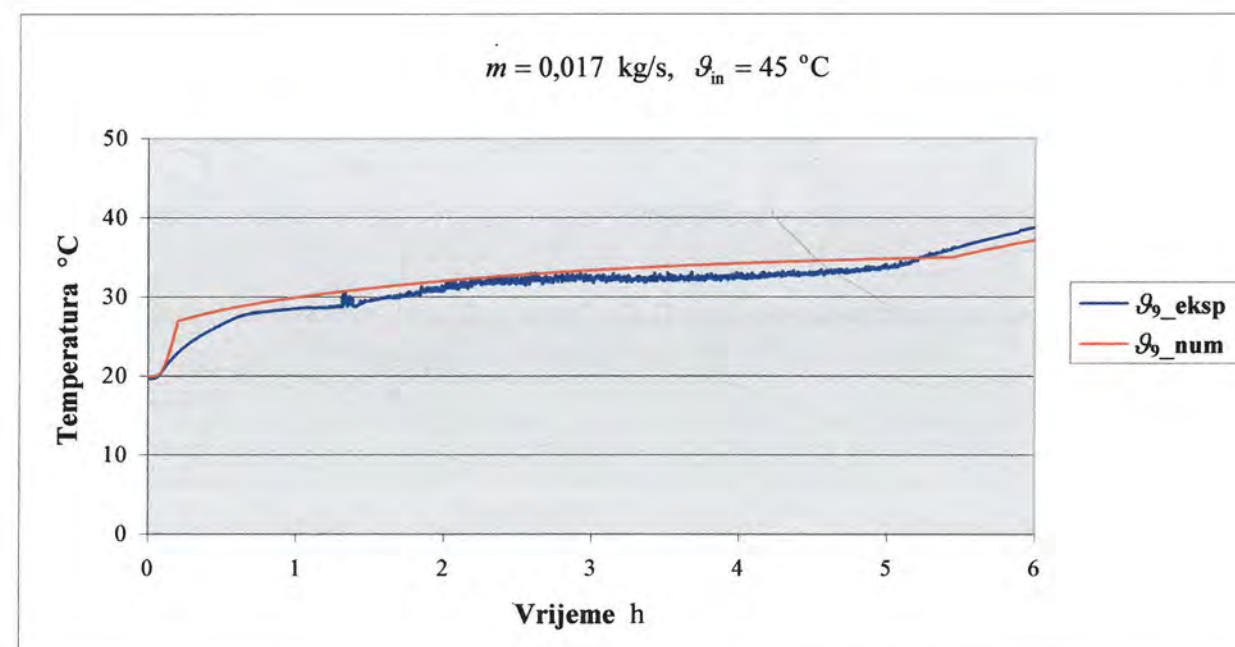


Slika 31. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

Iz dijagrama je vidljivo prilično dobro slaganje rezultata numeričke i eksperimentalne analize unutar određene mjerne nesigurnosti. U numerički je proračun na temelju deklarirane vrijednosti od strane proizvođača akumulatora topline uvrštena konstantna vrijednost temperature taljenja, međutim mjerenjima je uočeno da se taljenje korištenog parafina vrši unutar određenog temperaturnog intervala što uzrokuje određena odstupanja izračunatih temperatura od izmjerenih vrijednosti. Da bi se dobilo bolje slaganje izračunatih i izmjerenih vrijednosti, odnosno da bi se numerički proračun što više približio stvarnom fizikalnom procesu taljenja parafina pri spremanju topline, razvijeni je računalni program modificiran uvrštavanjem temperaturnog intervala taljenja akumulatora topline. Kao donja vrijednost temperaturnog intervala uvrštena je vrijednost temperature taljenja parafina deklarirana od strane proizvođača koja kod korištenog parafina RT 30 iznosi  $27,7 \text{ °C}$ , a kao gornja vrijednost temperaturnog intervala uvrštena je vrijednost dobivena eksperimentalnim istraživanjima koja iznosi  $35 \text{ °C}$ . Numerički je proračun zatim ponovljen modificiranim programskim paketom te su dobiveni rezultati prikazani na sljedećim dijagramima.



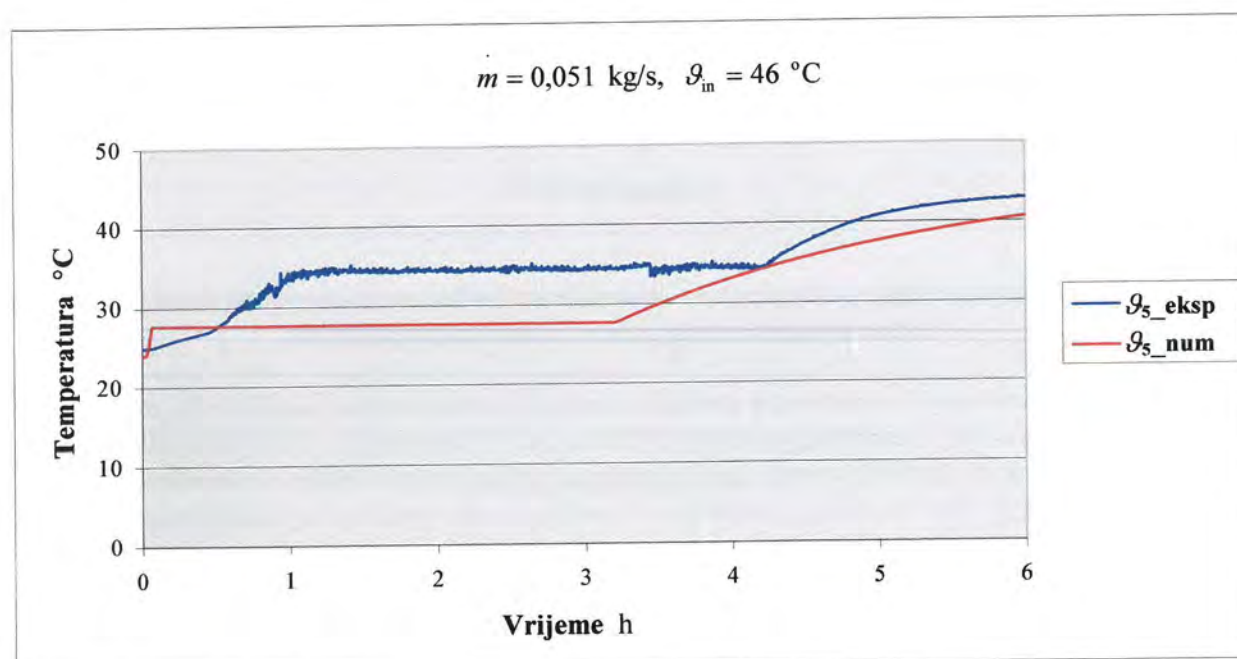
Slika 32. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom



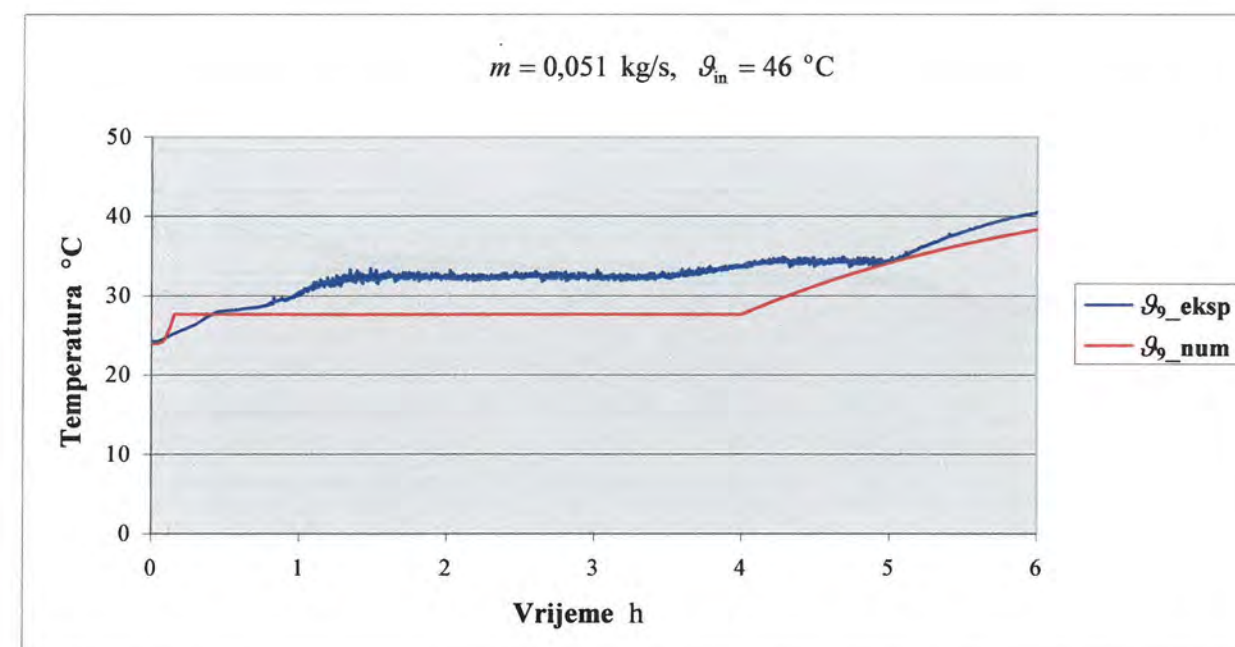
Slika 33. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

Usporedbom rezultata primijenjenog numeričkog i eksperimentalnog istraživanja uočeno je vrlo dobro slaganje vremenskih promjena temperatura akumulatora topline tj. uočeno je da postavljeni numerički model i razvijeni računalni program dobro matematički opisuju fizikalne pojave izmjene topline u latentnom spremniku.

U svrhu dodatne provjere numeričkog modela numerička je analiza primijenjena i na slučaj masenog protoka fluida od 0,051 kg/s, te ulazne temperature od 46 °C. Najprije je izvršen proračun za slučaj konstantne temperature taljenja akumulatora topline. Usporedba rezultata dobivenih numeričkim proračunom s rezultatima eksperimenta prikazana je u sljedećim dijagramima.

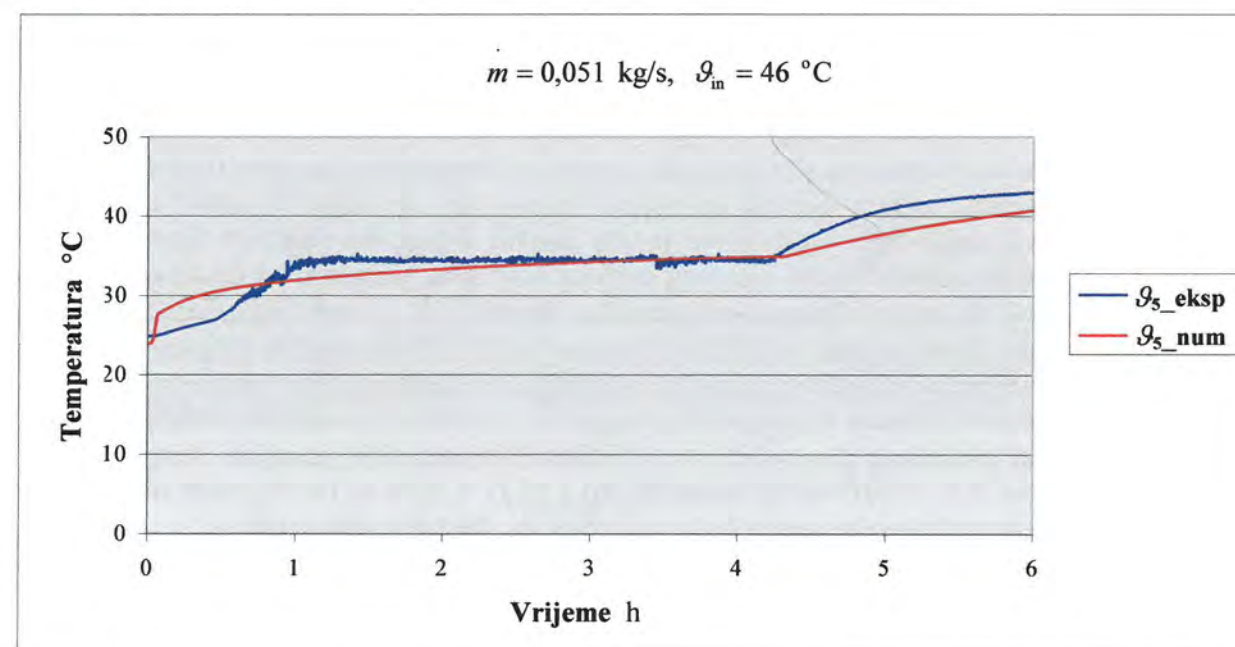


Slika 34. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

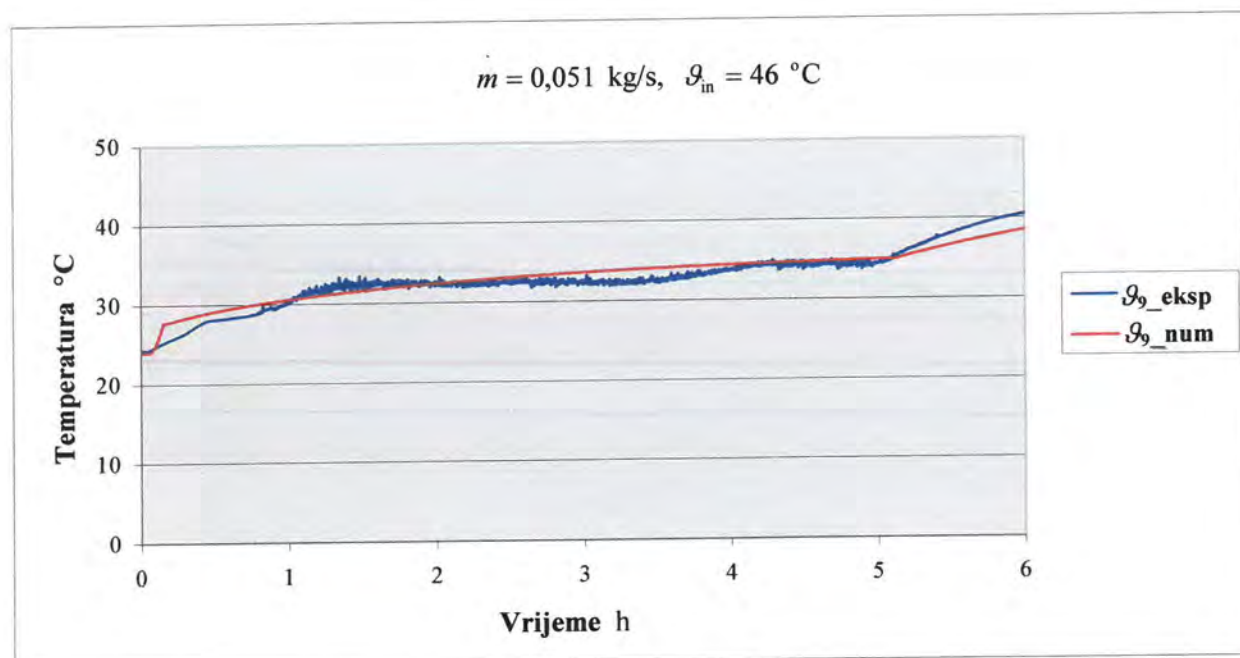


Slika 35. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

Numerički je proračun zatim izvršen računalnim programom kojim se taljenje akumulatora topline vrši unutar zadanog temperaturnog intervala te su dobiveni rezultati prikazani na sljedećim dijagramima.



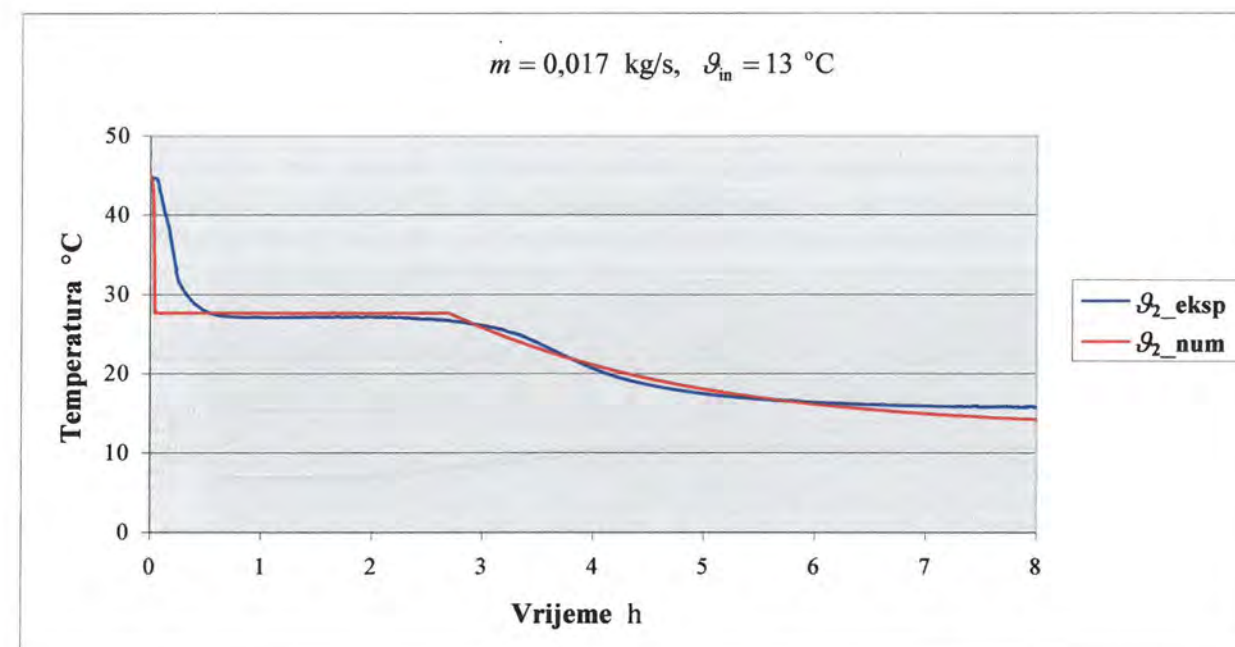
Slika 36. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom



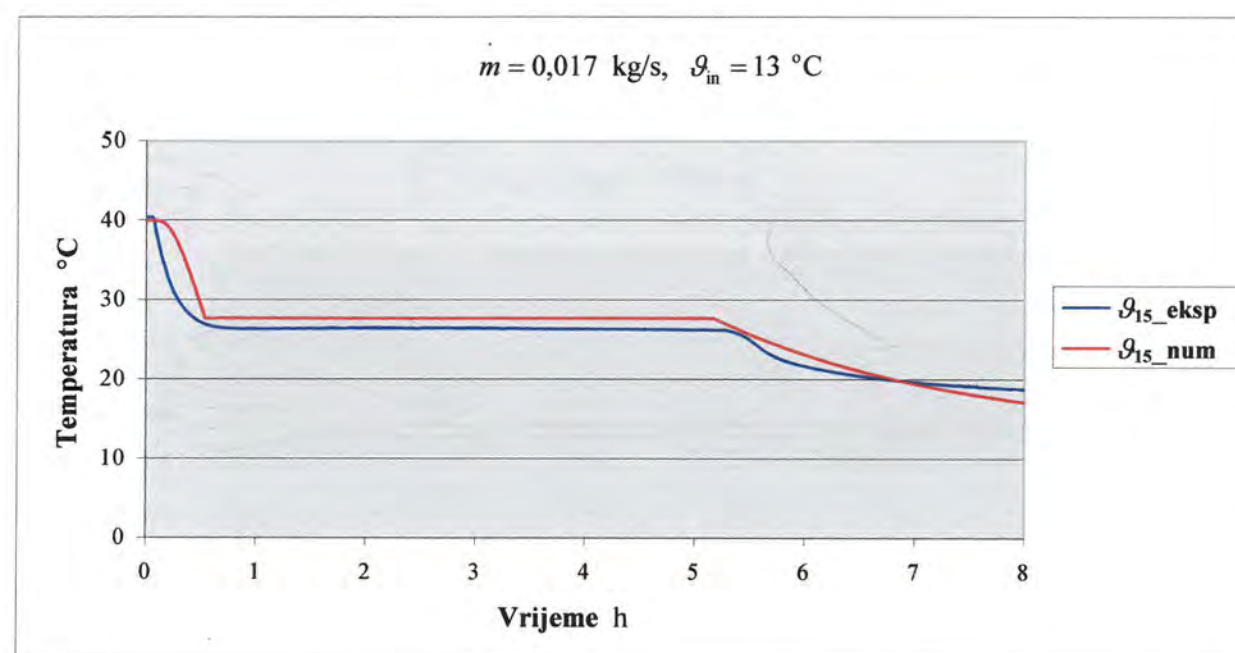
Slika 37. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

Iz dijagrama je vidljivo vrlo dobro slaganje rezultata dobivenih eksperimentom i numeričkim putem te je zaključeno da je razvijen numerički proračun pogodan za termodinamičku analizu procesa taljenja akumulatora topline odnosno procesa spremanja topline.

Prilikom korištenja akumulirane topline, akumulator topline predaje spremljenu toplinu fluidu koji struji kroz spremnik pri čemu dolazi do skrućivanja tj. promjene agregatnog stanja akumulatora topline iz kapljevito u kruto. Za numeričku obradu procesa skrućivanja razvijen je sličan kompjuterski program onomu za proces taljenja te su njime obrađeni slučajevi iz eksperimentalnog istraživanja kako bi se mogla izvršiti usporedba rezultata. Računalnim je programom obrađen najprije slučaj masenog protoka vode kroz spremnik od 0,017 kg/s. Ulazna temperatura vode u model latentnog spremnika iznosila je 13 °C. Eksperiment procesa skrućivanja akumulatora topline vršen je u vremenu od 8 h. Navedeni su pogonski uvjeti uz fizikalna svojstva fluida, stijenke i akumulatora topline, te konstrukcijske parametre spremnika uneseni kao ulazne veličine u kompjuterski program te je izvršen numerički proračun. U svrhu provjere točnosti proračuna uspoređene su vrijednosti vremenskih promjena temperatura na mjernim mjestima 2 ( $x = 0,05$  m i  $r = 0,0355$  m) i 15 ( $x = 0,95$  m i  $r = 0,0445$  m) dobivene numeričkim i eksperimentalnim putem što je prikazano na sljedećim dijagramima.



Slika 38. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

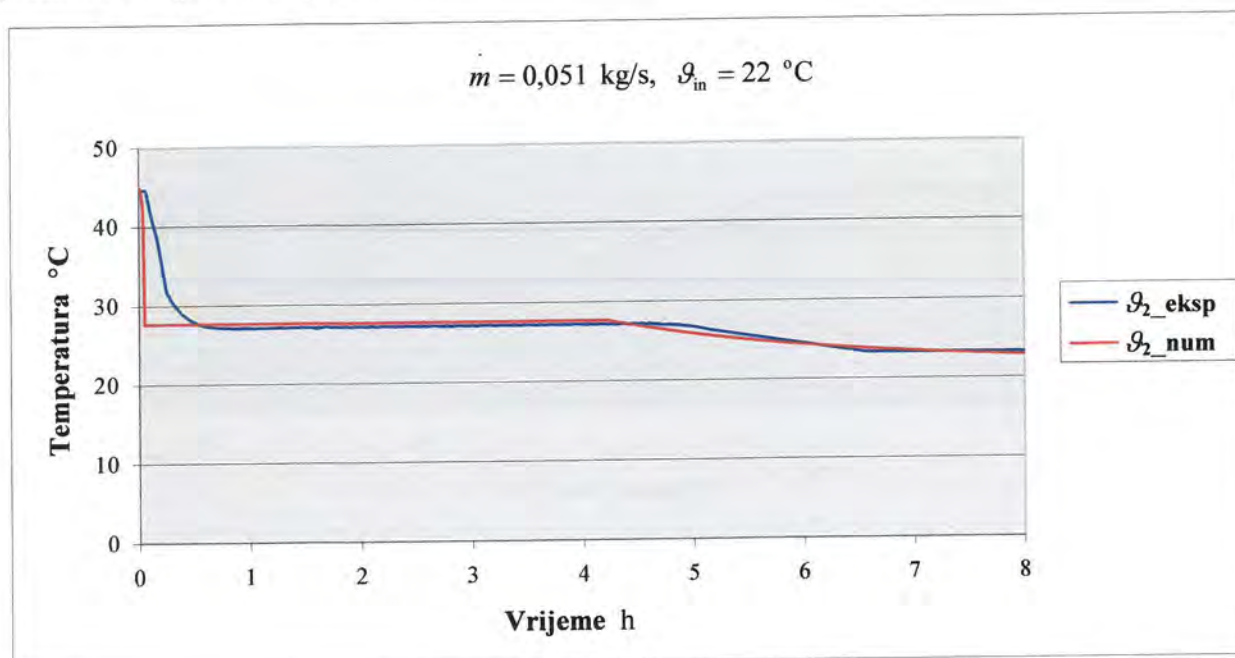


Slika 39. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

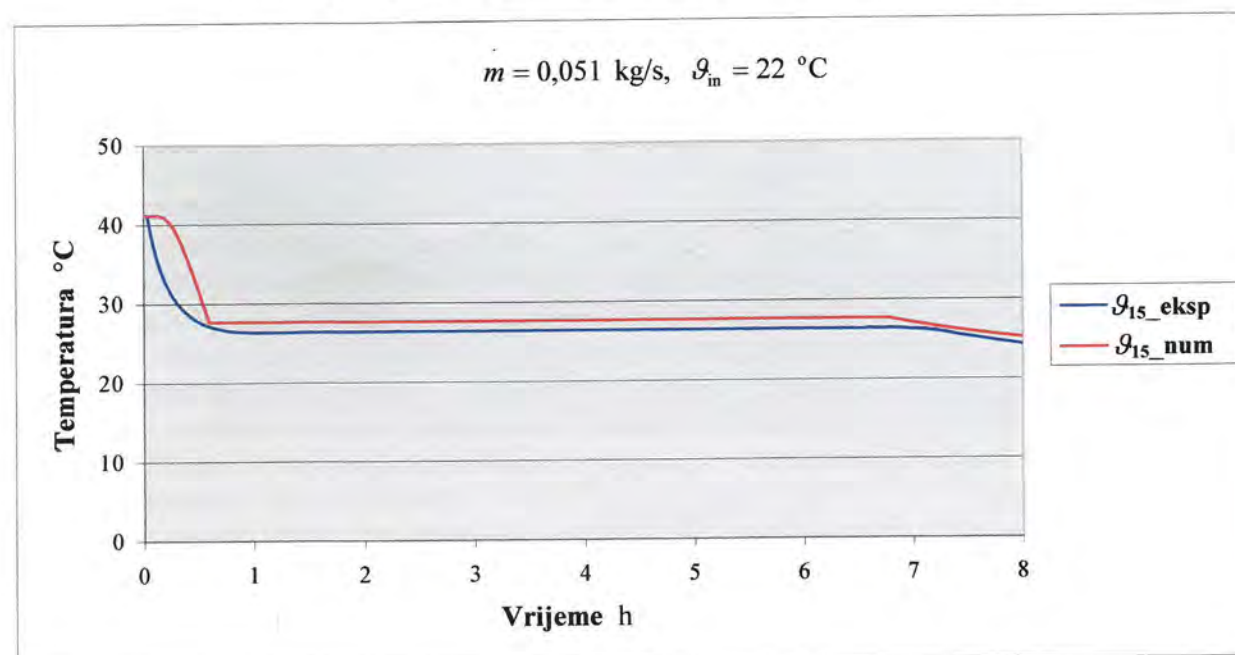
Iz dijagrama je vidljivo vrlo dobro slaganje rezultata eksperimenta i numeričkog proračuna.



U svrhu dodatne provjere numeričkog modela numerička je analiza primijenjena i na slučaj masenog protoka fluida od 0,051 kg/s, te ulazne temperature od 22 °C, te su dobiveni rezultati prikazani na sljedećim dijagramima.



Slika 40. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom



Slika 41. Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom

Iz dijagrama je vidljivo vrlo dobro slaganje rezultata eksperimentalnih istraživanja i numeričkog proračuna te je zaključeno da je razvijeni numerički proračun pogodan za termodinamičku analizu procesa skrućivanja akumulatora topline odnosno korištenja topline iz spremnika.

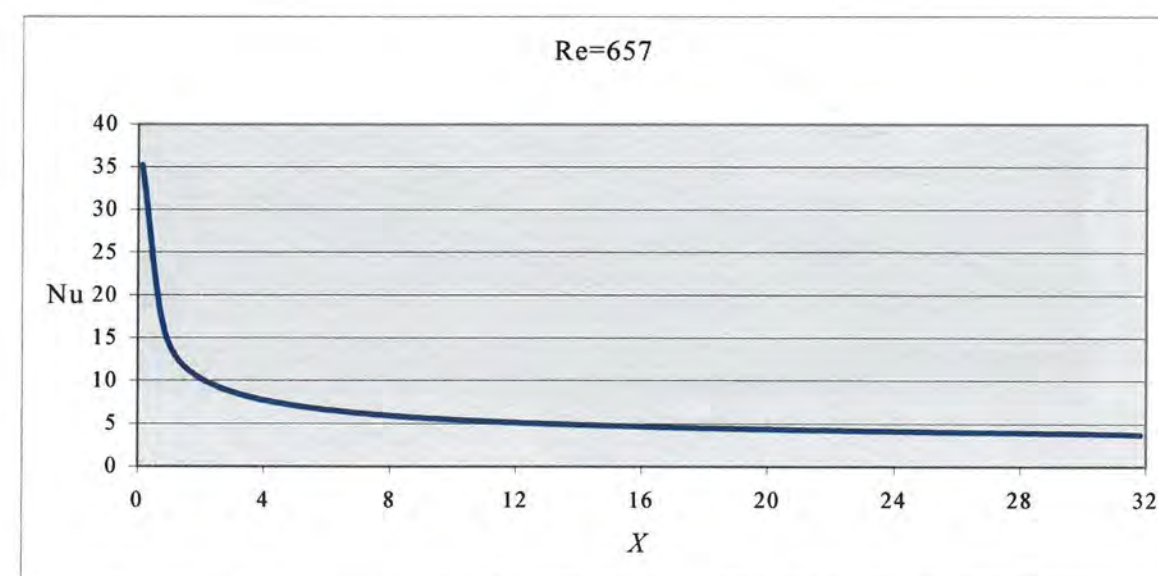
U nastavku ovoga rada proces složenih fizikalnih pojava nestacionarne izmjene topline u latentnom spremniku analiziran je numeričkim putem pri čemu je računato polje strujanja fluida i temperaturna polja fluida, stijenke i akumulatora topline u zadanim vremenskim intervalima.

## 6.2 Rezultati numeričke analize

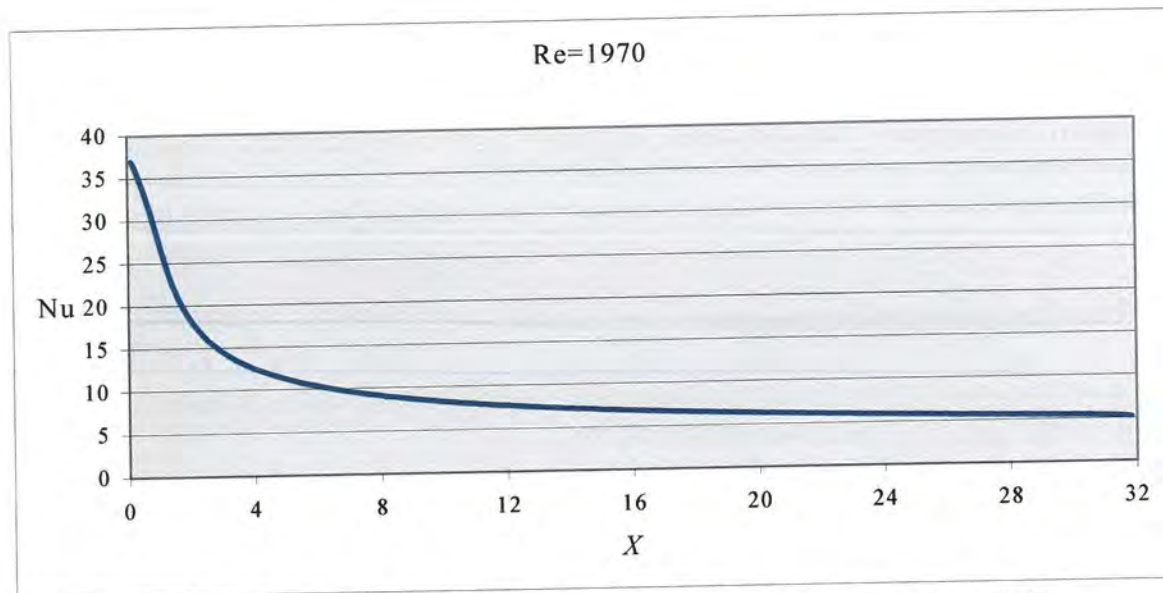
U ovom su poglavlju prikazani rezultati numeričke analize za segmentni dio spremnika latentne topline korišten u eksperimentalnim istraživanjima.

### 6.2.1 Proračun polja strujanja fluida

Numeričkim proračunom diferencijalnih jednadžbi strujanja pri prisilnoj konvekciji između fluida i stijenke cijevi dobiveno je polje strujanja za nestišljivi laminarni tok. Proračunom je uočeno da polje brzina vrlo brzo postiže stacionarno stanje tj. dobiva se potpuno razvijeno polje brzina, te nakon kratkog vremena profil brzina duž cijevi ostaje nepromijenjen. Numeričkim je proračunom dobiven tok lokalne Nusseltove značajke računane primjenom izraza (3.55), kojom je opisan konvektivni prijelaz topline duž cijevi. Dobivene vrijednosti lokalnih Nusseltovih značajki za slučaj prisilne konvekcije pri strujanju vode s prosječnom ulaznom brzinom 0,02 m/s, i pripadnom Reynoldsovom značajkom  $Re=657$ , te pri strujanju vode s prosječnom ulaznom brzinom 0,06 m/s, i pripadnom Reynoldsovom značajkom  $Re=1970$  prikazane su na slikama 42 i 43.

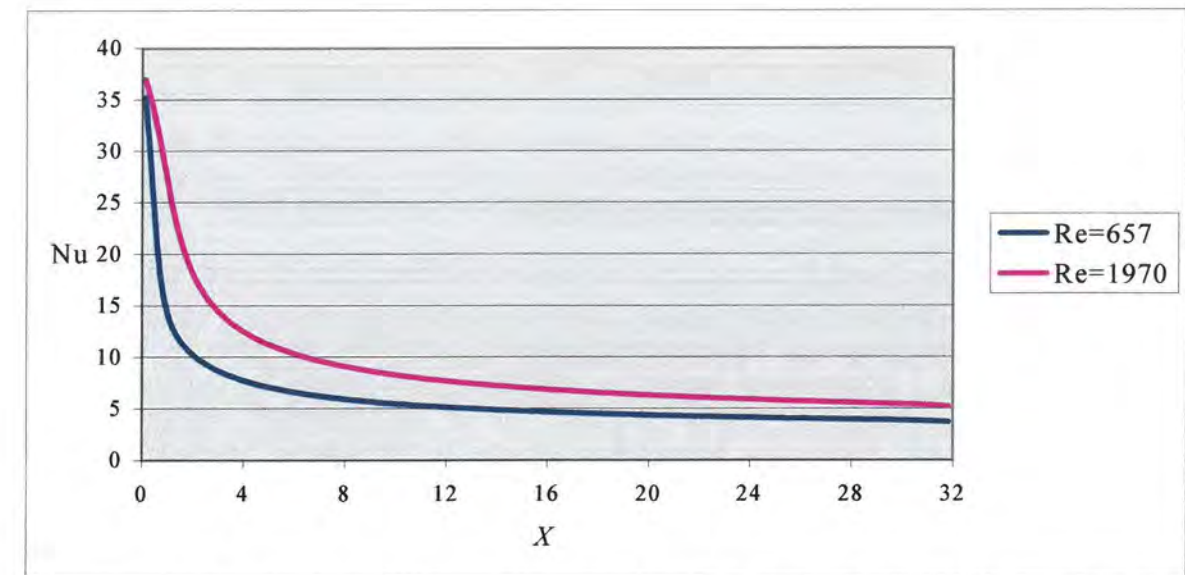


Slika 42. Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za  $Re = 657$

Slika 43. Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za  $Re = 1970$ 

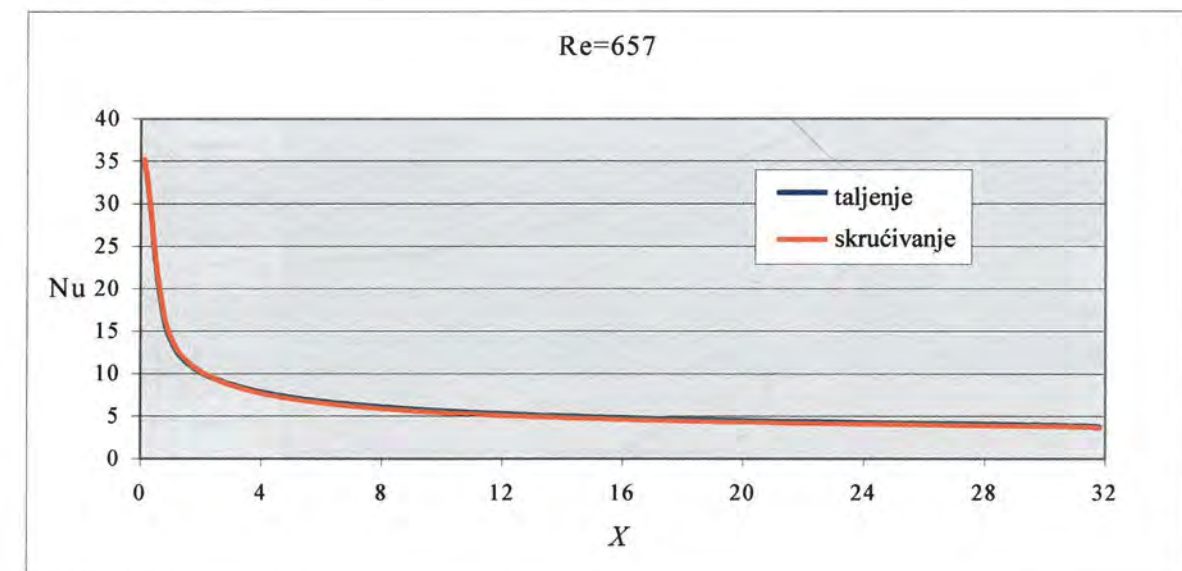
Iz dijagrama je vidljivo da je lokalna Nusseltova značajka tj. lokalni koeficijent prijelaza topline u oba promatrana slučaja najveći na ulazu fluida u cijev te da zatim opada duž cijevi. Prema tome i prijelaz topline konvekcijom intenzivniji je na ulazu fluida u spremnik. Temperatura fluida uz stijenku cijevi mijenja se kako granica taljenja napreduje pa temperaturno polje fluida nikada ne postiže potpuno razvijeno stanje. Ukoliko se pri proračunu prijenosa topline konvekcijom s fluida na stijenku cijevi koriste korelacije za potpuno razvijeno toplinsko stanje uvodi se značajna greška. Za konvektivni je prijelaz topline pri laminarnom prisilnom strujanju stoga potrebno odrediti polje strujanja i temperaturno polje fluida. Prijelaz topline konvekcijom potrebno je računati istovremeno s problemom izmjene topline pri promjeni faze akumulatora topline.

Usporedbom toka promjene Nusseltove značajke duž cijevi za vrijednosti Reynoldsove značajke od 657 i 1970 odnosno za različite brzine strujanja fluida dobiveni su rezultati prikazani na slici 44.

Slika 44. Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za  $Re = 657$  i  $Re = 1970$ 

Iz dijagrama je vidljivo da je prijelaz topline konvekcijom intenzivniji za slučaj veće Reynoldsove značajke, tj. za slučaj veće brzine strujanja fluida, pa je taljenje akumulatora topline brže. Brzina taljenja veća je na manjoj udaljenosti od ulaza u spremnik zbog većeg lokalnog koeficijenta prijelaza topline što uzrokuje intenzivniji prijelaz topline.

Tok promjene Nusseltove značajke duž cijevi uspoređen je za slučaj taljenja i slučaj skrućivanja akumulatora topline što je prikazano na slici 45.



Slika 45. Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi prilikom taljenja i prilikom skrućivanja akumulatora topline

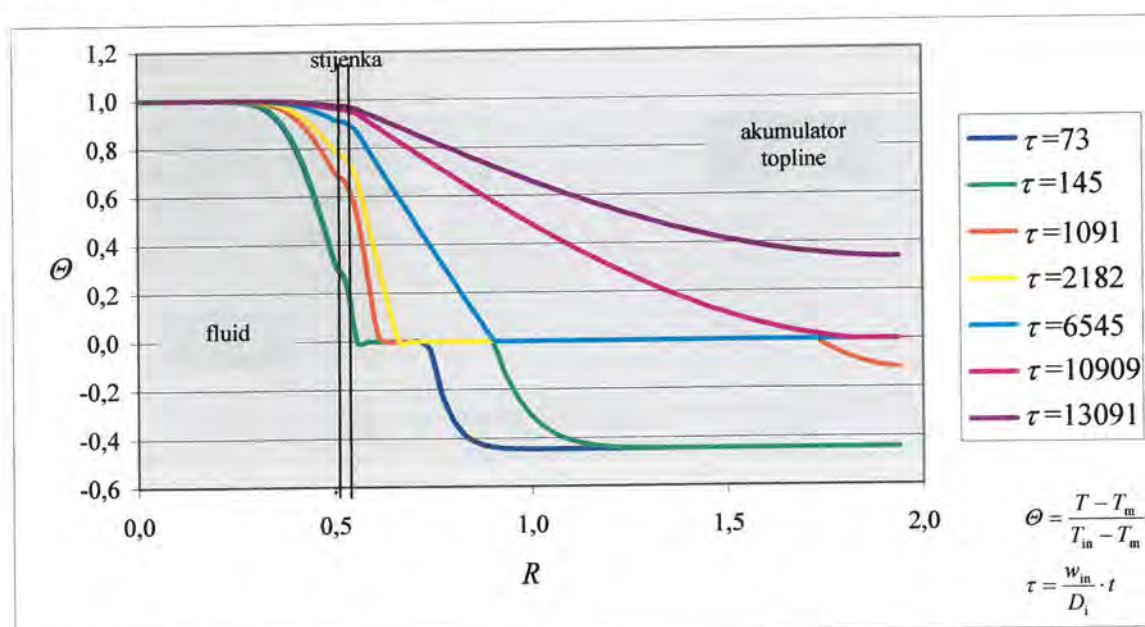
Iz slike je vidljivo da je tok promjene Nusseltove značajke duž cijevi isti za slučaj taljenja i za slučaj skrućivanja akumulatora topline pa prethodno prikazani rezultati vrijede i za slučaj spremanja topline, kao i za slučaj korištenja topline iz latentnog spremnika.

### 6.2.2 Proračun temperaturnog polja pri procesu taljenja akumulatora topline

Numeričkim proračunom nestacionarnog prijelaza topline prisilnom konvekcijom između fluida i stijenke, provođenja topline kroz stijenku cijevi te izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline pri spremanju topline unutar latentnog spremnika dobivena su temperaturna polja fluida, stijenke i akumulatora topline u različitim vremenskim intervalima. Ovim je proračunom posebno razmatran proces izmjene topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline kod konstantne temperature taljenja te pri taljenju akumulatora topline unutar zadanog temperaturnog intervala.

#### 6.2.2.1 Konstantna temperatura taljenja akumulatora topline

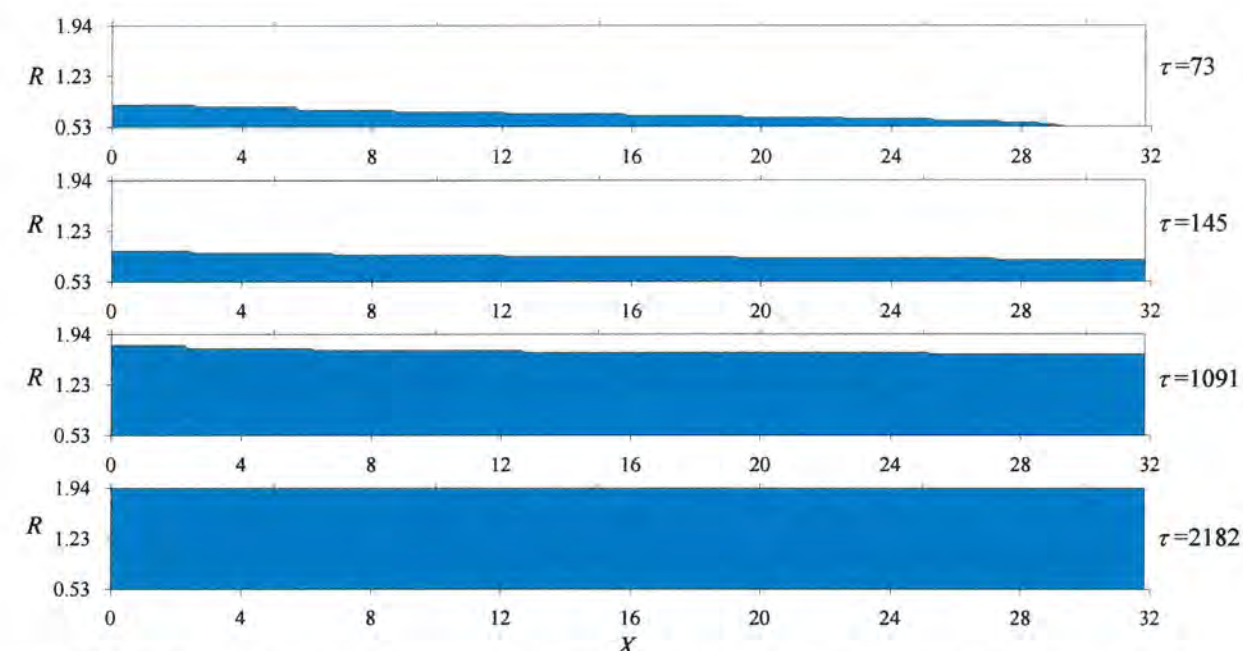
Prvim je proračunom obrađen slučaj masenog protoka fluida od 0,017 kg/s, pri čemu je njegova prosječna ulazna brzina u spremnik iznosila 0,02 m/s. Ulazna temperatura fluida u spremnik iznosila je 318 K. Početno je akumulator topline bio u krutoj fazi s početnom temperaturom 293 K. Ukupna površina izmjene topline iznosila je 0,12 m<sup>2</sup>. Ukupna spremljena toplina unutar akumulatora topline za vrijeme taljenja iznosila je 2,26 MJ u vremenu od 6 h. Reynoldsova značajka u ovom slučaju iznosi 657, a Stefanova značajka 0,2. Proračunom je dobivena eksergijska iskoristivost spremnika od 0,39. Temperaturna polja dobivena numeričkim proračunom prikazana su u sljedećim dijagramima.



Slika 46. Radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

Na slici 46 prikazana je radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 0,4 \cdot \frac{L}{D_i}$ , tj. na udaljenosti  $X = 12,73$ , od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima. Na dijagramu su označena područja fluida, stijenke cijevi te akumulatora topline. Granice (slobodne površine) taljenja u različitim vremenima presjecišta su vrijednosti bezdimenzijske temperature  $\Theta = 0$  i odgovarajućih temperaturnih krivulja. Taljenje započinje oko unutarnje cijevi te se širi u unutrašnjost vanjske cijevi u kojoj je smješten akumulator topline. U bezdimenzijskim vremenima  $\tau = 73$ ,  $\tau = 145$  i  $\tau = 1091$  akumulator topline u blizini vanjske površine stijenke unutarnje cijevi dostigao je temperaturu taljenja dok je na većim udaljenostima od stijenke cijevi još uvijek u krutom agregatnom stanju i vrši se zagrijavanje krute faze do postizanja temperature taljenja. Granica taljenja pomiče se sve više u desno te prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Iz dijagrama je vidljivo da je u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 2182$  granica taljenja došla do unutarnjeg promjera vanjske cijevi tj. sav se akumulator topline nalazi u području taljenja. Kako granica taljenja napreduje, temperaturne krivulje pomiču se prema gore. Za  $\tau = 13091$  sav je akumulator topline rastaljen te zagrijavanjem kapljevite faze dolazi do porasta njegove temperature.

Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slici 47. Plavom su bojom na slici označena područja taljenja i područja kapljevite faze akumulatora topline po završetku procesa taljenja.

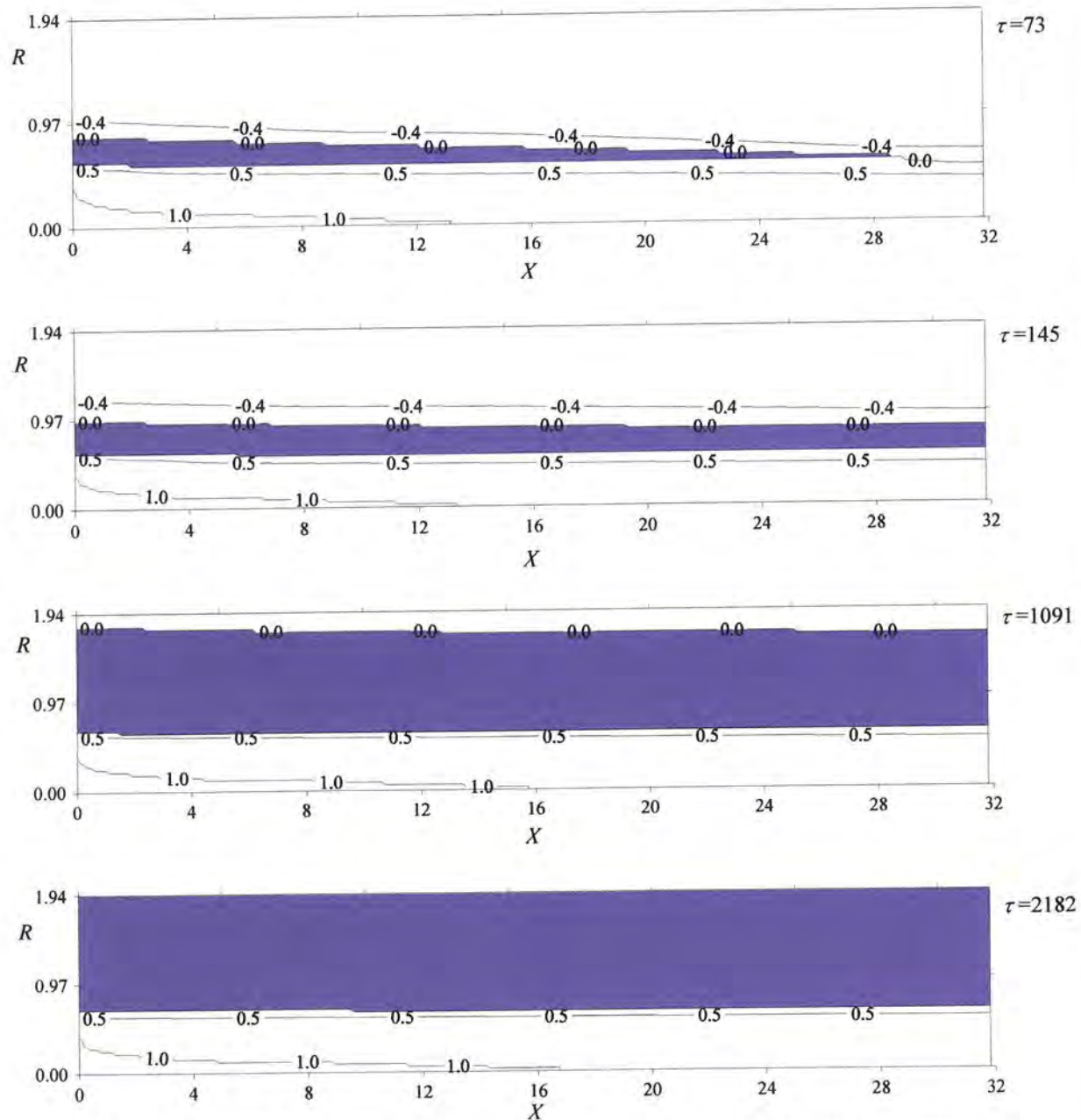


Slika 47. Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

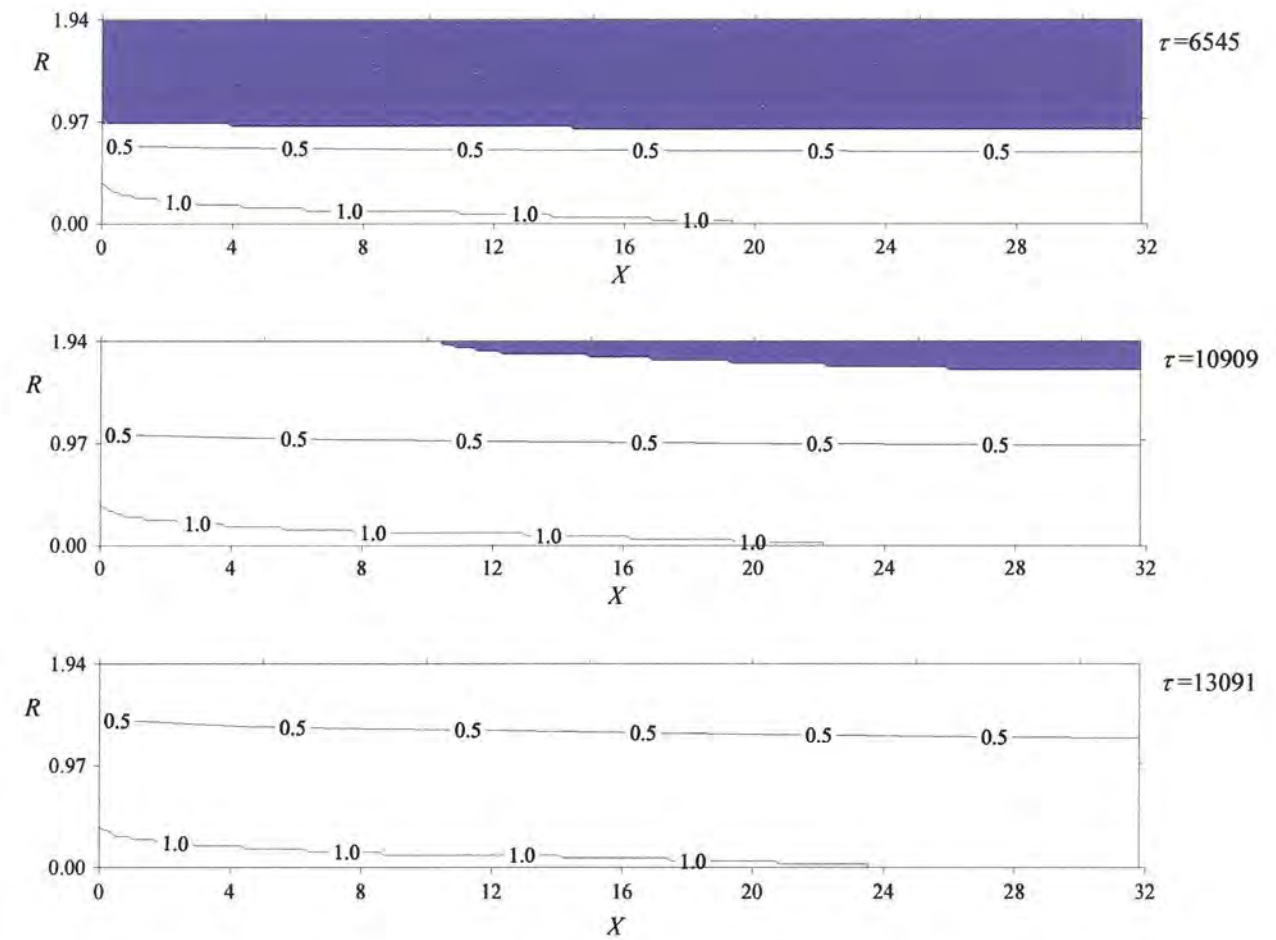
Iz slike je vidljivo da taljenje započinje na vanjskoj površini unutarnje cijevi. Granica taljenja širi se uz vanjsku stijenku unutarnje cijevi od ulaza do izlaza iz spremnika brže nego prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Razlog je tome što je Prandtlova značajka fluida relativno velika tj. njegov je koeficijent vodljivosti topline mali pa se velika količina topline prenosi u

smjeru struje, a samo se mala količina topline predaje akumulatoru topline poprečno na smjer struje fluida. U slučajevima manjih Prandtlovih značajki fluida predaja topline akumulatoru topline u radialnom smjeru puno je veća.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 48a i 48b. Ljubičastom su bojom na slikama označena područja taljenja akumulatora topline.



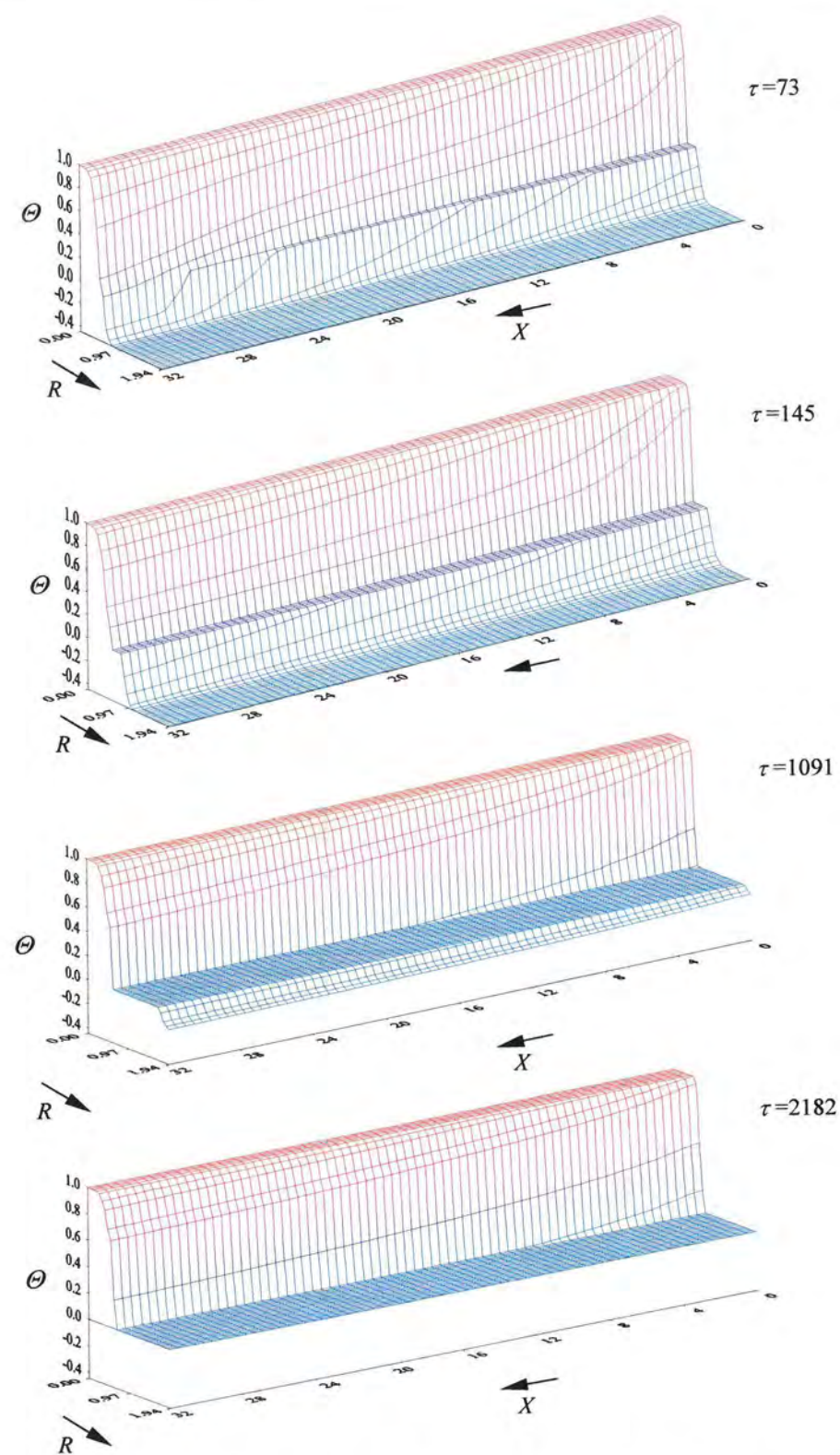
Slika 48a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$



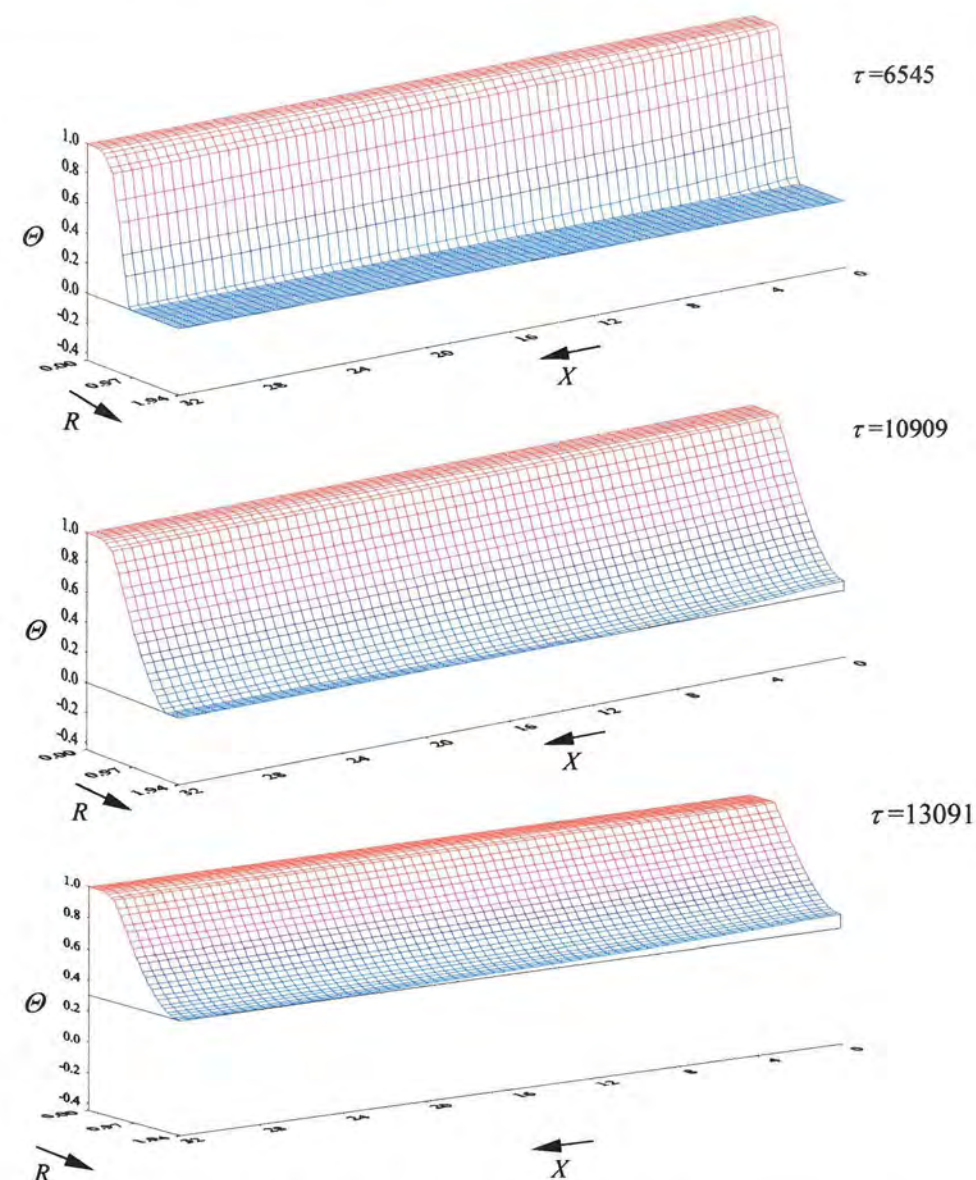
Slika 48b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

Iz slika 48a i 48b vidi se da taljenje započinje na vanjskoj površini unutarnje cijevi na ulazu fluida u spremnik. Širenjem područja taljenja te pomicanjem granice taljenja prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi izoterme se pomiču sve više prema gore. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 10909$  samo je još mala količina akumulatora topline uz unutarnju površinu vanjske cijevi u području taljenja, dok se u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 13091$  vrši zagrijavanje kapljevite faze ukupne količine akumulatora topline unutar spremnika.

Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenke cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 49a i 49b.



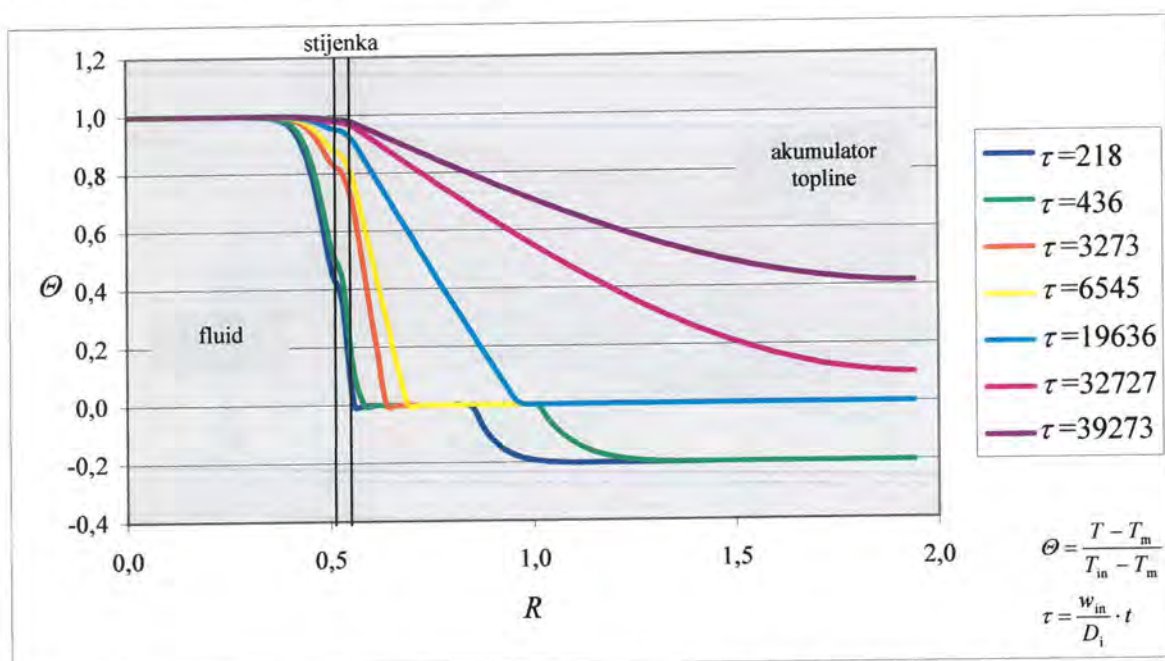
Slika 49a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$



Slika 49b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

Iz prostornih dijagrama na slikama 49a i 49b vidljivo je pomicanje granice taljenja od površine uz vanjsku stijenku unutarnje cijevi na ulazu fluida u spremnik prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Granica taljenja se brzo proširi uz vanjsku stijenku unutarnje cijevi od ulaza do izlaza iz spremnika, dok je njeno širenje prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi sporije. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau=2182$  područje taljenja proširilo se do unutarnjeg promjera vanjske cijevi, a uz vanjsku površinu unutarnje cijevi dolazi do zagrijavanja kapljevite faze akumulatora topline na temperaturu višu od temperature taljenja. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau=13091$  potpuno je rastaljena ukupna količina akumulatora topline te se daljnjim dovođenjem topline sprema osjetna toplina kapljevite faze pri čemu njena temperatura raste.

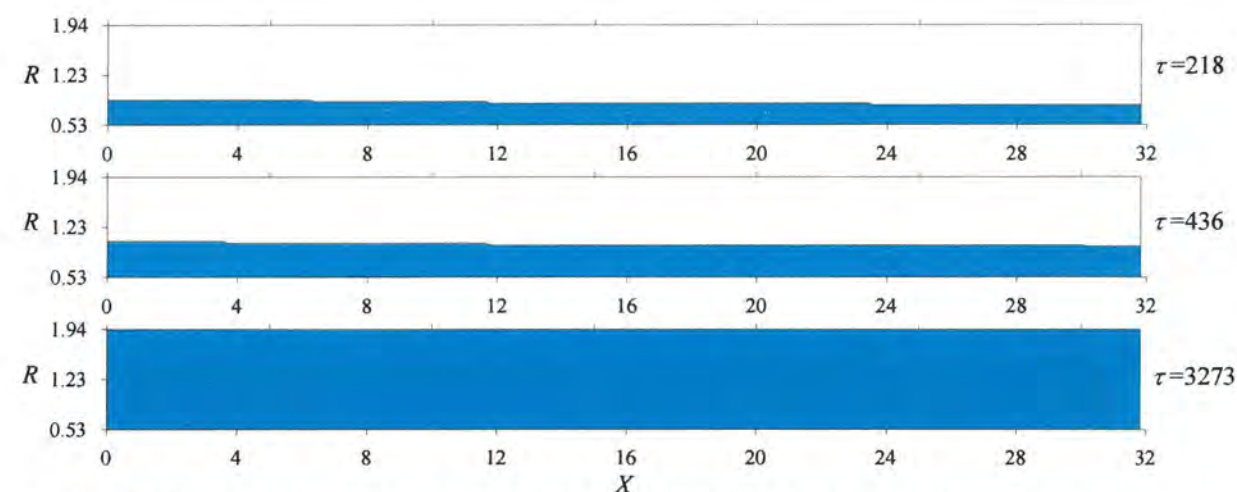
Drugim je proračunom obrađen slučaj masenog protoka fluida od 0,051 kg/s, odnosno prosječne ulazne brzine u spremnik od 0,06 m/s. Ulazna temperatura fluida u spremnik iznosila je 319 K. Početna je temperatura akumulatora topline, koji je u krutoj fazi, bila 298 K. Ukupna toplina spremljena unutar akumulatora topline za vrijeme taljenja iznosila je 2,22 MJ u vremenu od 6 h. Reynoldsova je značajka za ovaj slučaj 1970, a Stefanova značajka 0,21. Proračunom je dobivena eksergijska iskoristivost spremnika od 0,27. Temperaturna polja dobivena numeričkim proračunom prikazana su u sljedećim dijagramima.



Slika 50. Radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 1970$

Na slici 50 prikazana je radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima. Kao i u prethodnom slučaju, vidljivo je da taljenje započinje oko unutarnje cijevi te se širi u unutrašnjost vanjske cijevi u kojoj je smješten akumulator topline. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 32727$  sav je akumulator topline rastaljen te dolazi do povećanja temperature kapljevite faze.

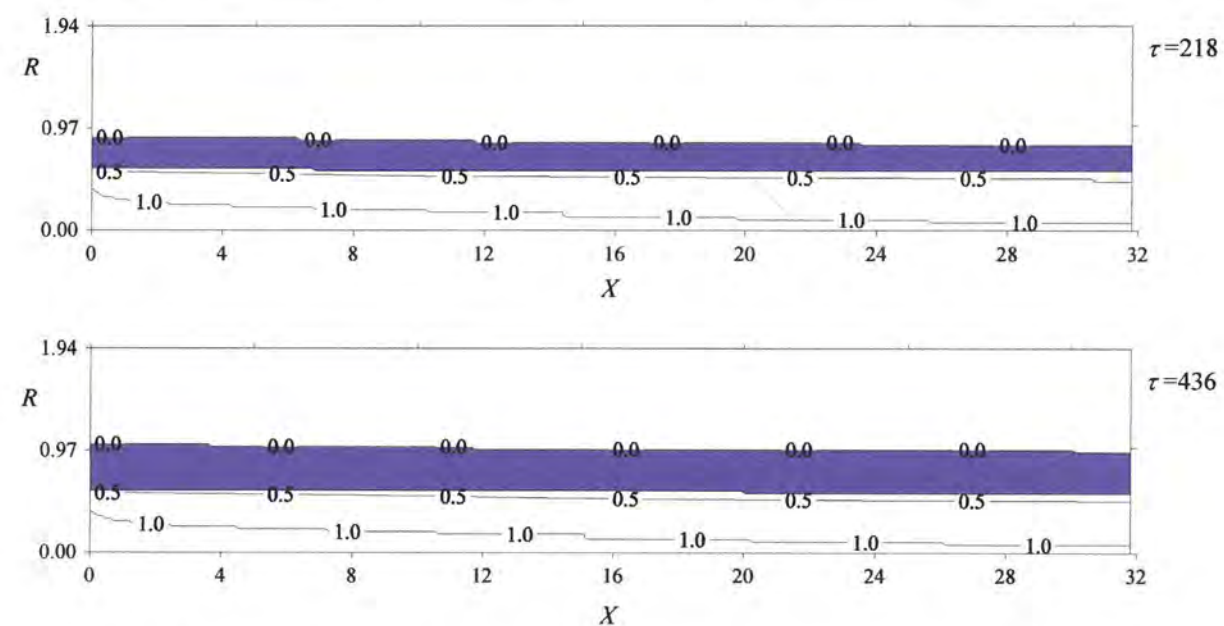
Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slici 51. Područja taljenja i područja kapljevite faze akumulatora topline po završetku procesa taljenja na slici su označena plavom bojom.



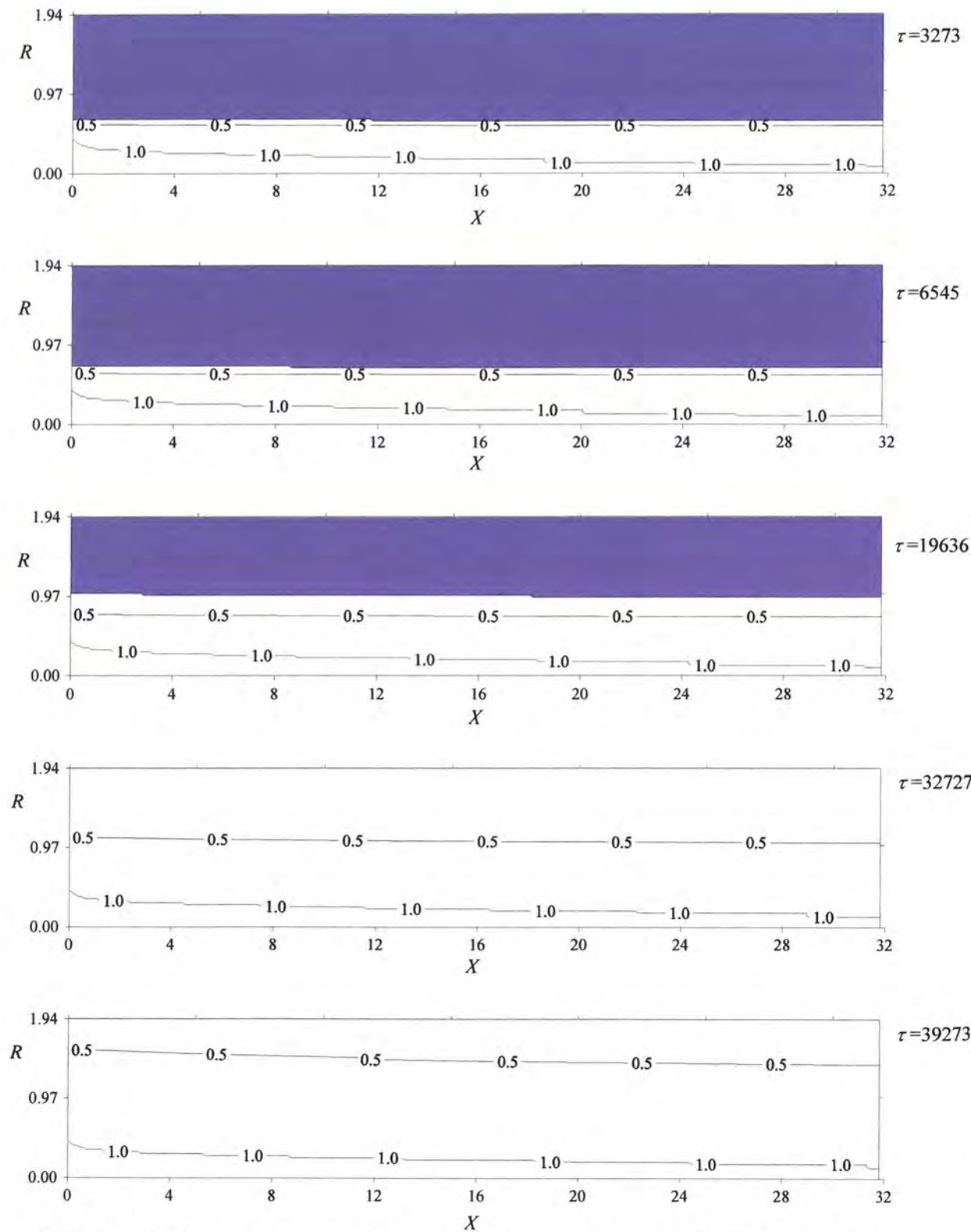
Slika 51. Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 1970$

Iz slike 51 vidljivo je širenje granice taljenja unutar latentnog spremnika. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 3273$  ukupna se količina akumulatora topline unutar spremnika nalazi u području taljenja.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 52a i 52b. Područja taljenja akumulatora topline na slikama su označena ljubičastom bojom.



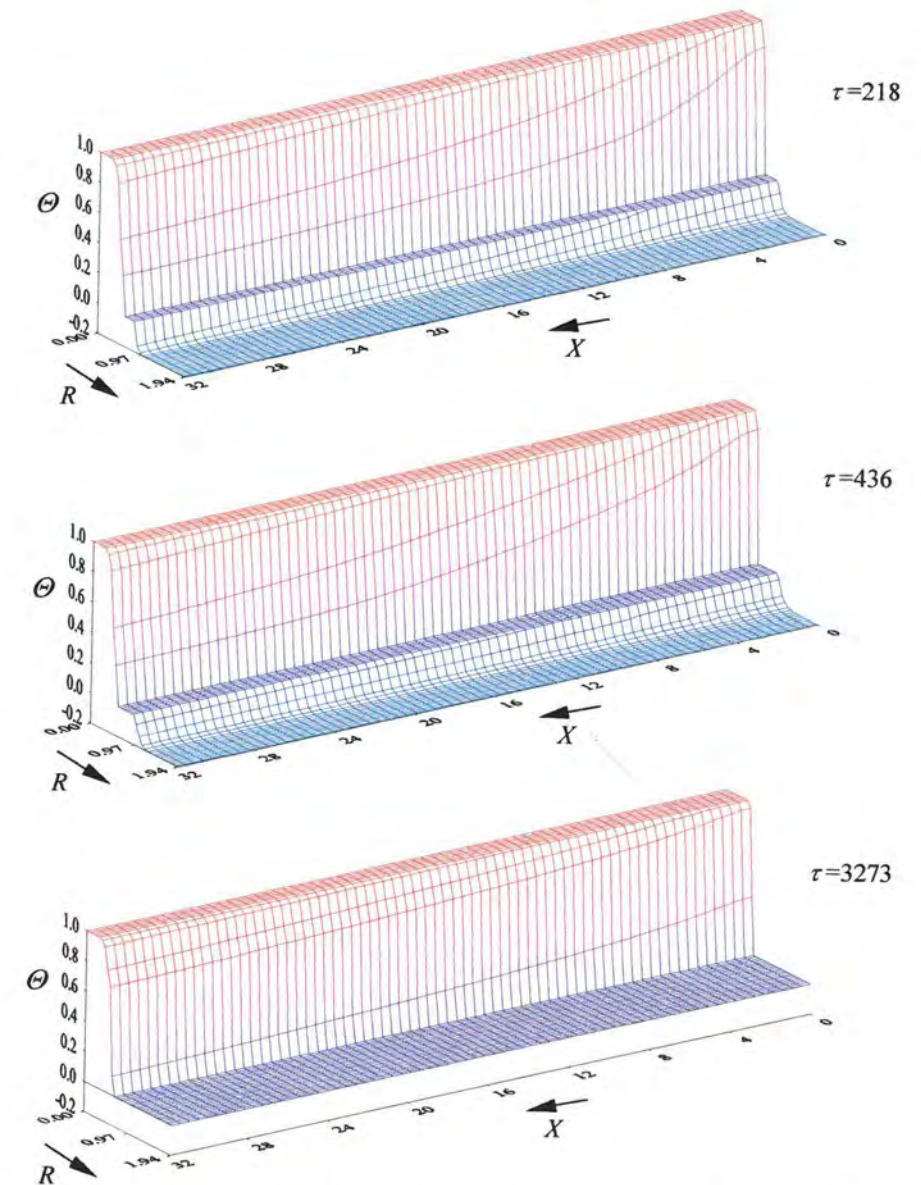
Slika 52a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$



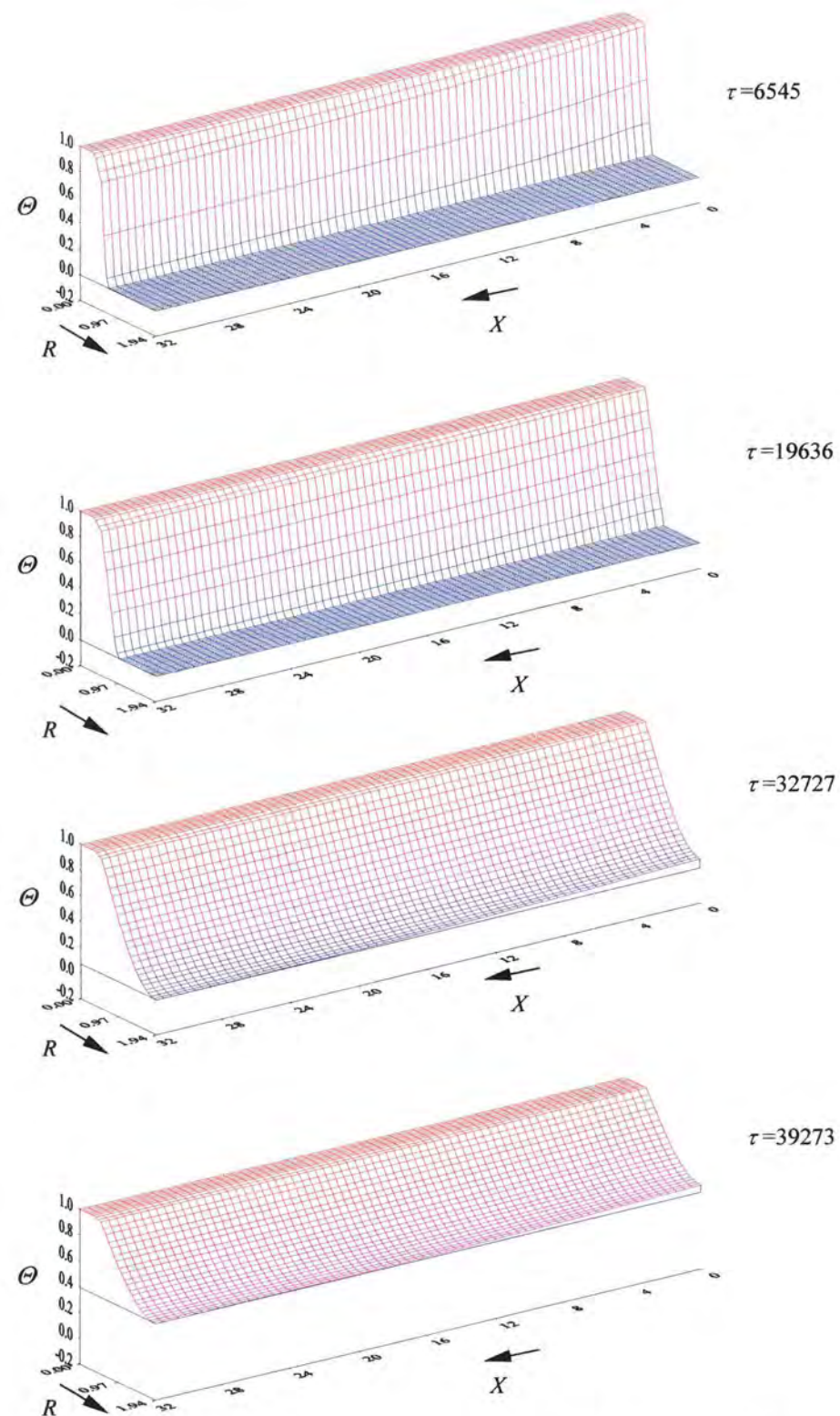
Slika 52b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$

Iz slika je vidljivo širenje područja taljenja unutar spremnika. Zbog veće brzine strujanja fluida u odnosu na prethodni slučaj (za  $Re=657$ ) granica taljenja se širi još brže od ulaza prema izlazu iz spremnika tj. veliki dio topline struja odnosi nizvodno pa je granica taljenja gotovo paralelna s osi cijevi. Pomicanjem granice taljenja izoterme se pomiču sve više prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi.

Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenke cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 53a i 53b.



Slika 53a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$



Slika 53b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$

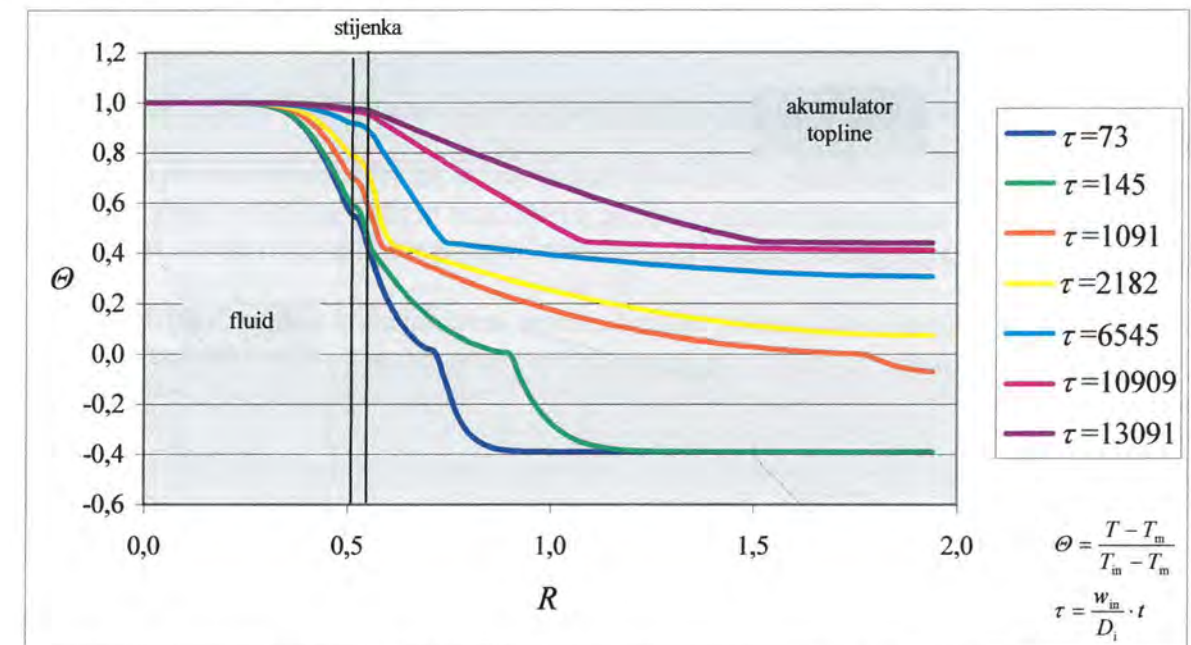
Iz prostornih je dijagrama također vidljivo pomicanje granice taljenja prema vanjskom radijusu spremnika te zagrijavanje kapljevine faze po završetku procesa taljenja.

### 6.2.2.2 Temperaturni interval taljenja akumulatora topline

Numerički je proračun za oba promatrana slučaja ponovljen programskim paketom koji taljenje akumulatora topline obrađuje unutar zadanog temperaturnog intervala.

Rezultati numeričkog proračuna za slučaj strujanja fluida s  $Re=657$  prikazani su na sljedećim dijagramima.

Radialna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 0,4 \cdot \frac{L}{D_i}$ , tj. na udaljenosti  $X = 12,73$ , od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima prikazana je na slici 54.

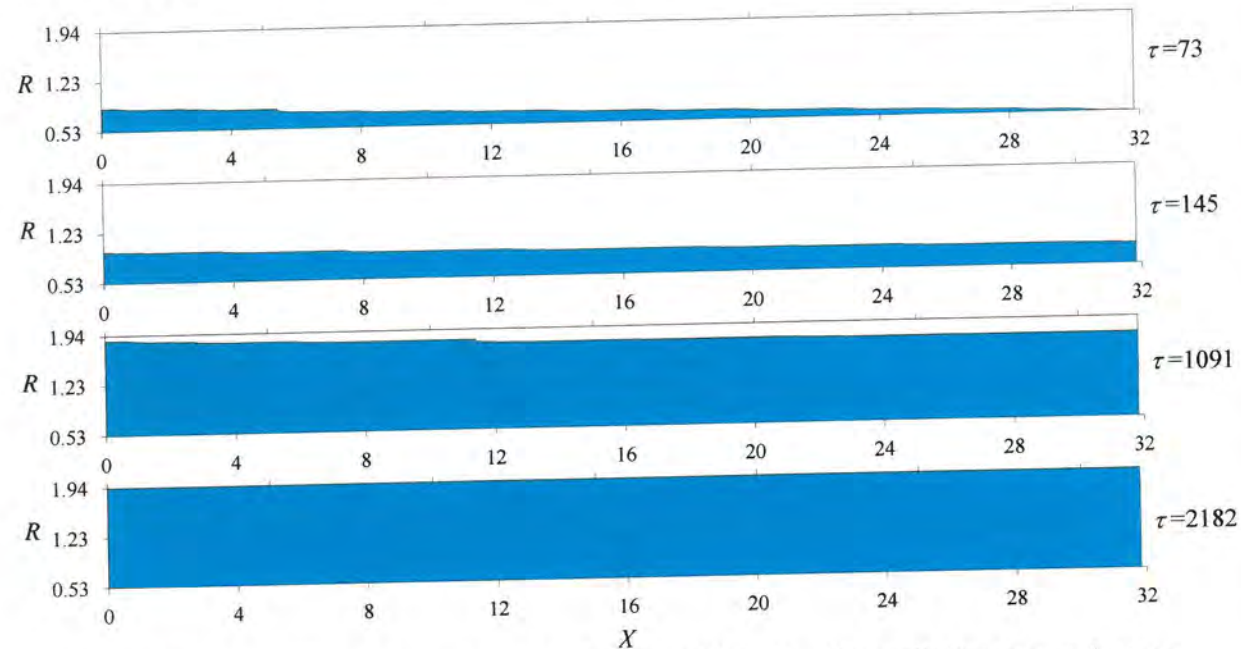


Slika 54. Radialna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,42$

Taljenje akumulatora topline vrši se u bezdimenzijskom temperaturnom intervalu od 0 do 0,42. Iz dijagrama se uočava da je porast temperature unutar intervala taljenja akumulatora topline blizu stijenske cijevi brži nego na većim udaljenostima od stijenske cijevi. Kao i u slučaju taljenja akumulatora topline pri konstantnoj temperaturi i u ovom je slučaju u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 13091$  akumulator topline već potpuno rastaljen.



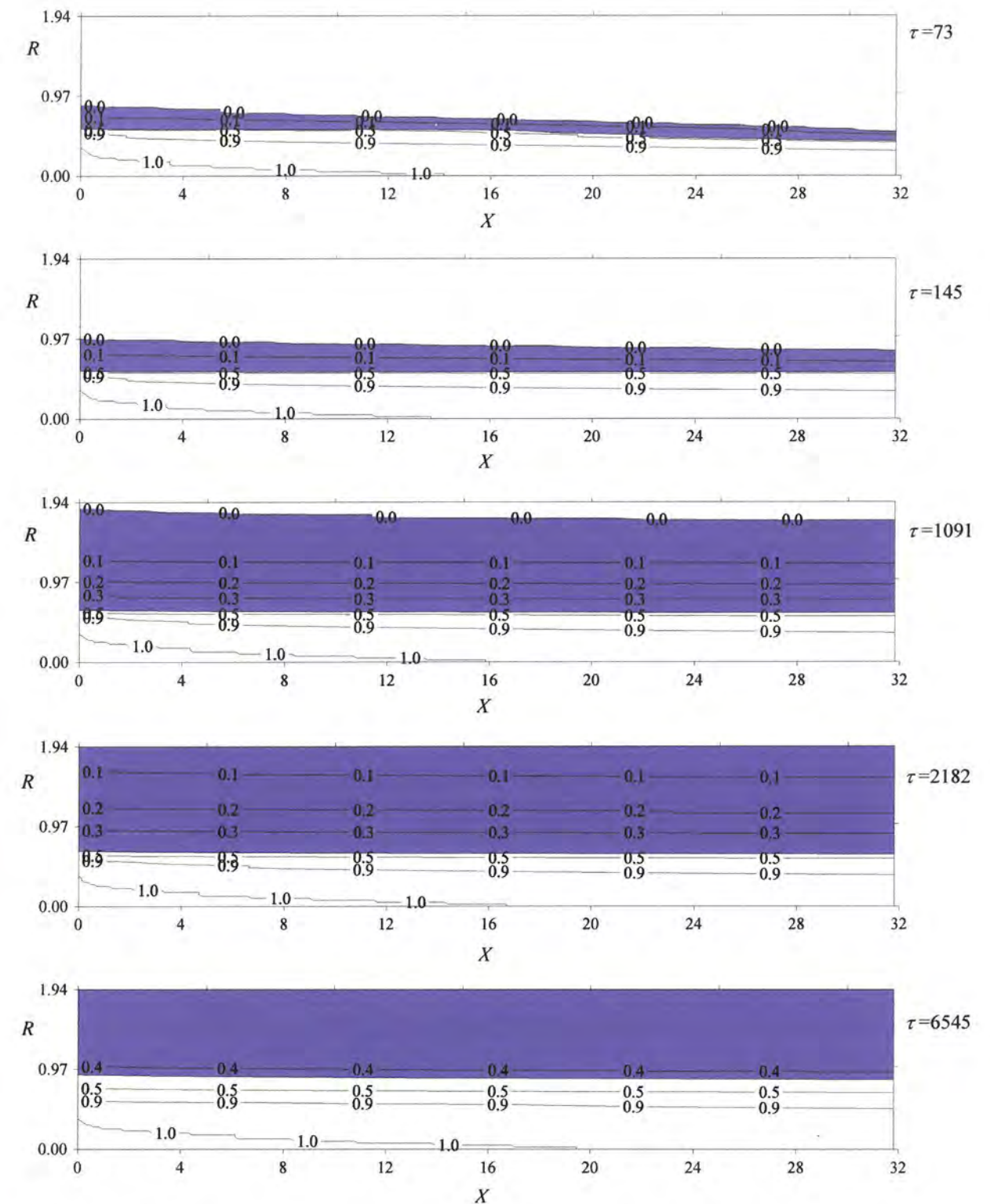
Na slici 55 prikazane su granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima. Plavom su bojom na slici označena područja taljenja i područja kapljevite faze akumulatora topline.



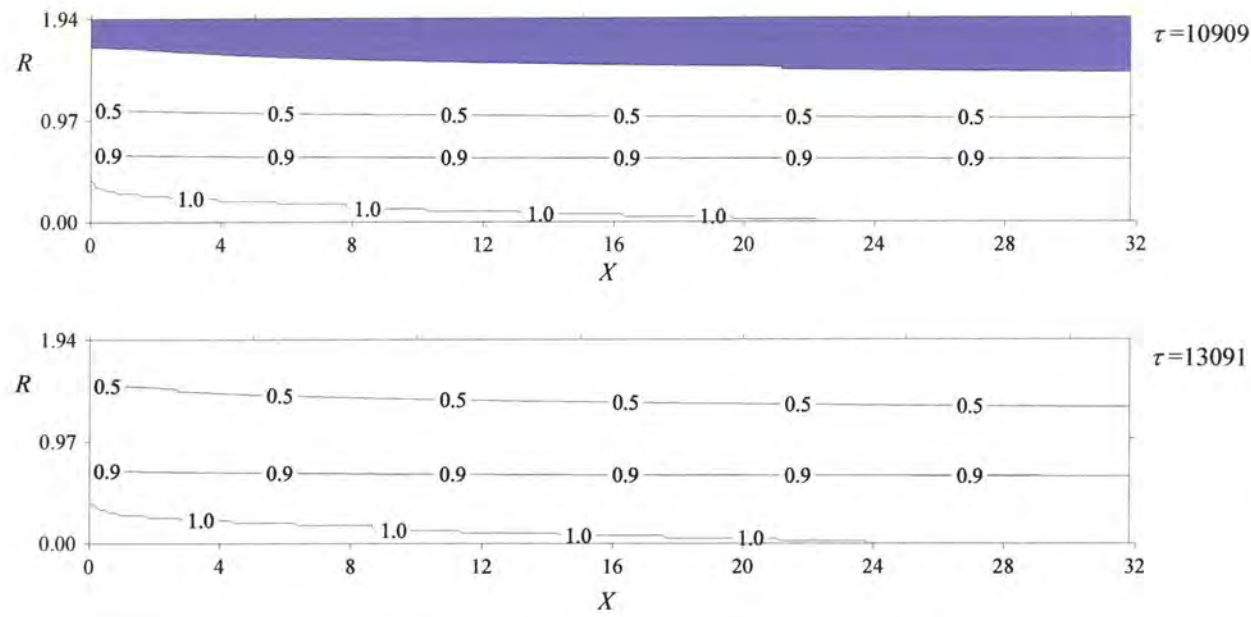
Slika 55. Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,42$

Iz slike je vidljivo pomicanje granica taljenja prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 2182$  ukupna količina akumulatora topline nalazi se u području taline.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 56a i 56b. Područja taljenja akumulatora topline na slikama su označena ljubičastom bojom.



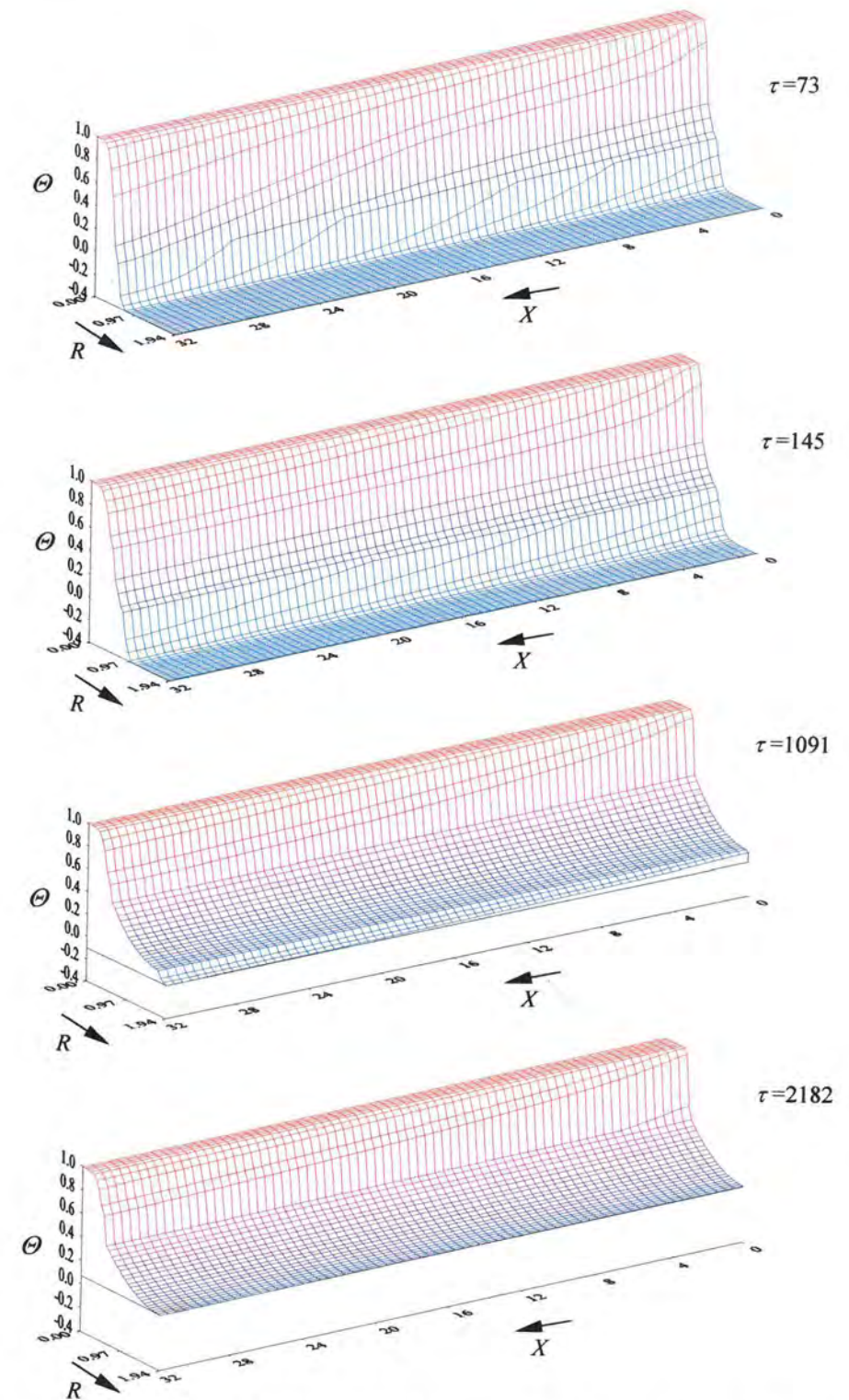
Slika 56a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,42$



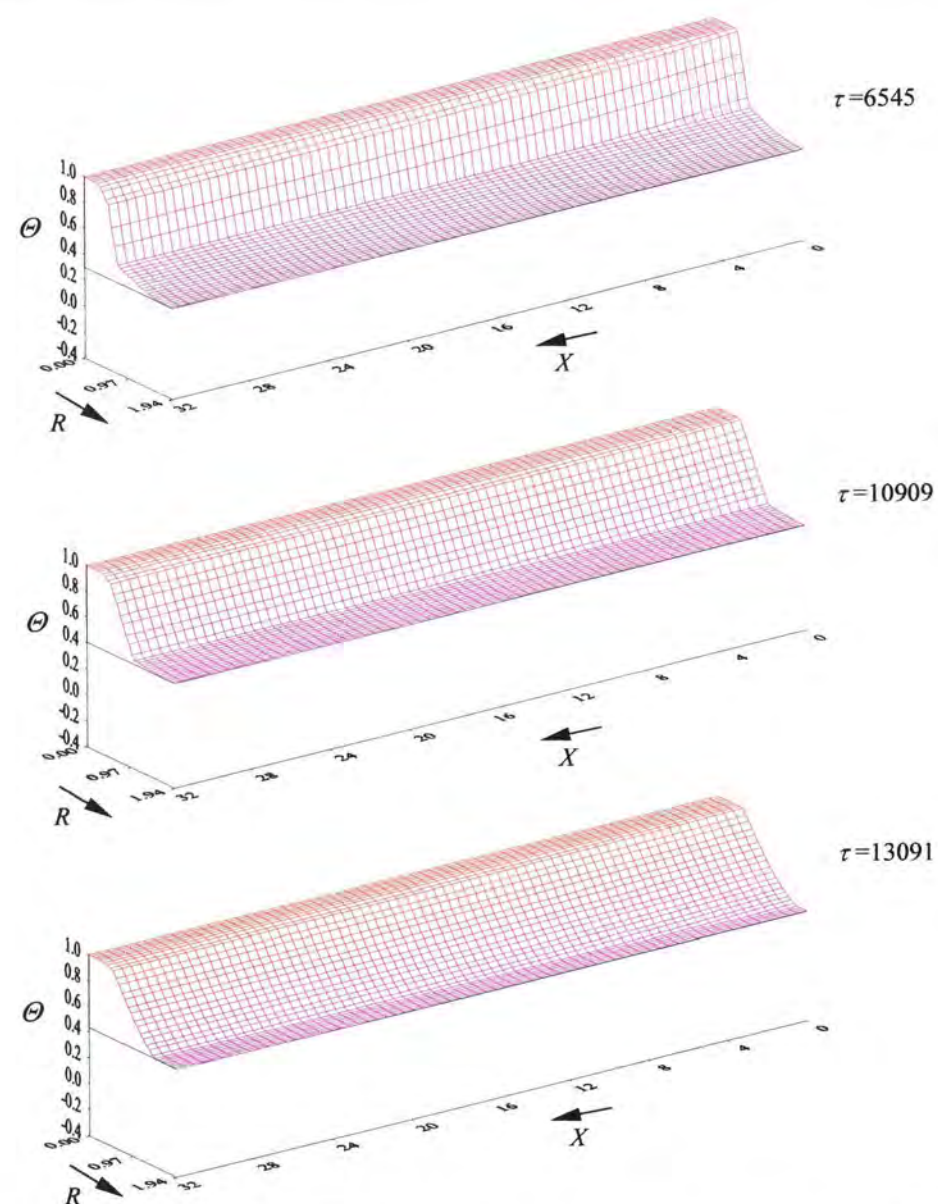
Slika 56b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,42$

Iz dijagrama na slikama 56a i 56b vidljivo je pomicanje izoterma prema vanjskom radijusu spremnika. Usporedbom sa izotermama za slučaj taljenja pri konstantnoj temperaturi vidljivo je da u ovom slučaju proces taljenja završava nešto kasnije budući da je i maksimalna temperatura taljenja temperaturnog intervala viša.

Na slikama 57a i 57b prikazane su prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenke cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima.



Slika 57a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,42$



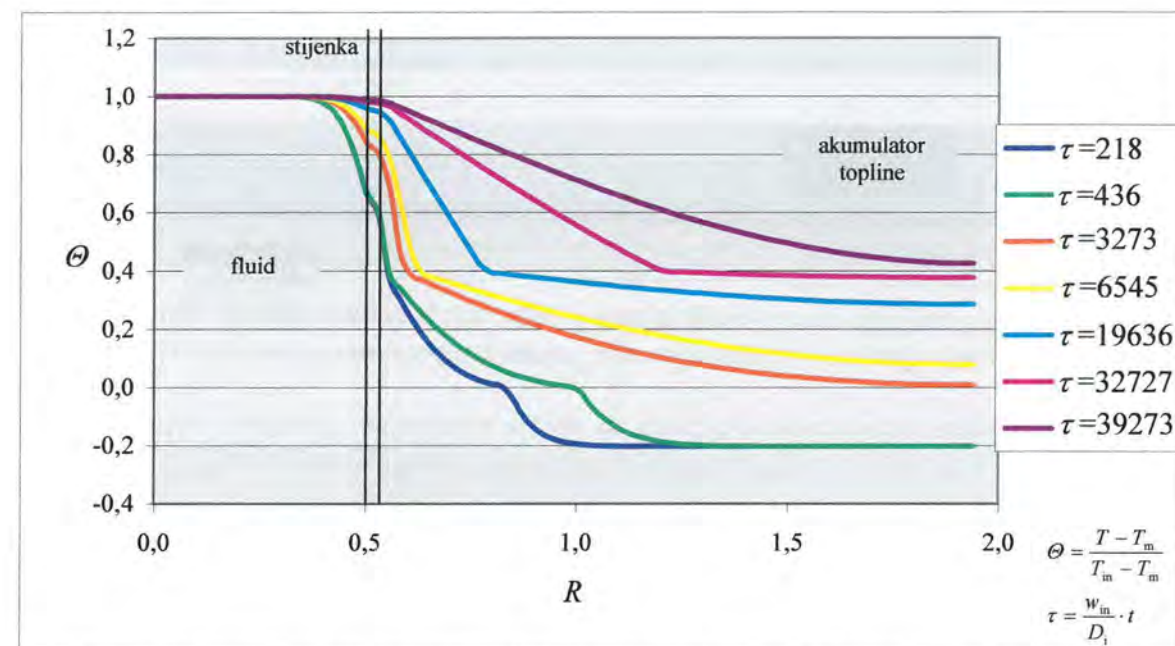
Slika 57b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala 0 – 0,42

Iz prostornih je dijagrama vidljivo pomicanje temperaturnih polja prema gore, međutim zbog temperaturnog intervala taljenja područje taljenja se teže uočava nego u slučaju taljenja pri konstantnoj temperaturi.

Ukupna spremljena toplina unutar akumulatora topline u vremenu od 6 h iznosi 2,11 MJ, a eksergijska iskoristivost spremnika 0,38.

Rezultati numeričkog proračuna za slučaj strujanja fluida s  $Re=1970$  prikazani su na sljedećim dijagramima.

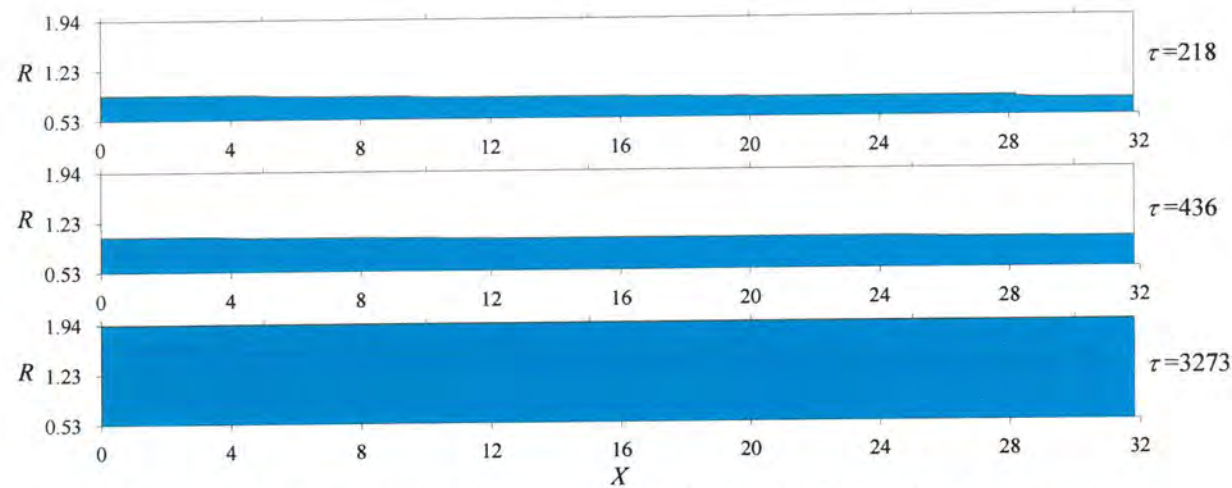
Na slici 58 prikazana je radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 0,4 \cdot \frac{L}{D_i}$ , tj. na udaljenosti  $X = 12,73$ , od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima.



Slika 58. Radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala 0 – 0,4

Taljenje akumulatora topline vrši se u bezdimenzijskom temperaturnom intervalu od 0 do 0,4. Za razliku od slučaja taljenja pri konstantnoj temperaturi u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 32727$  akumulator topline nalazi se još u području taljenja, ali je u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 39273$  već potpuno rastaljen.

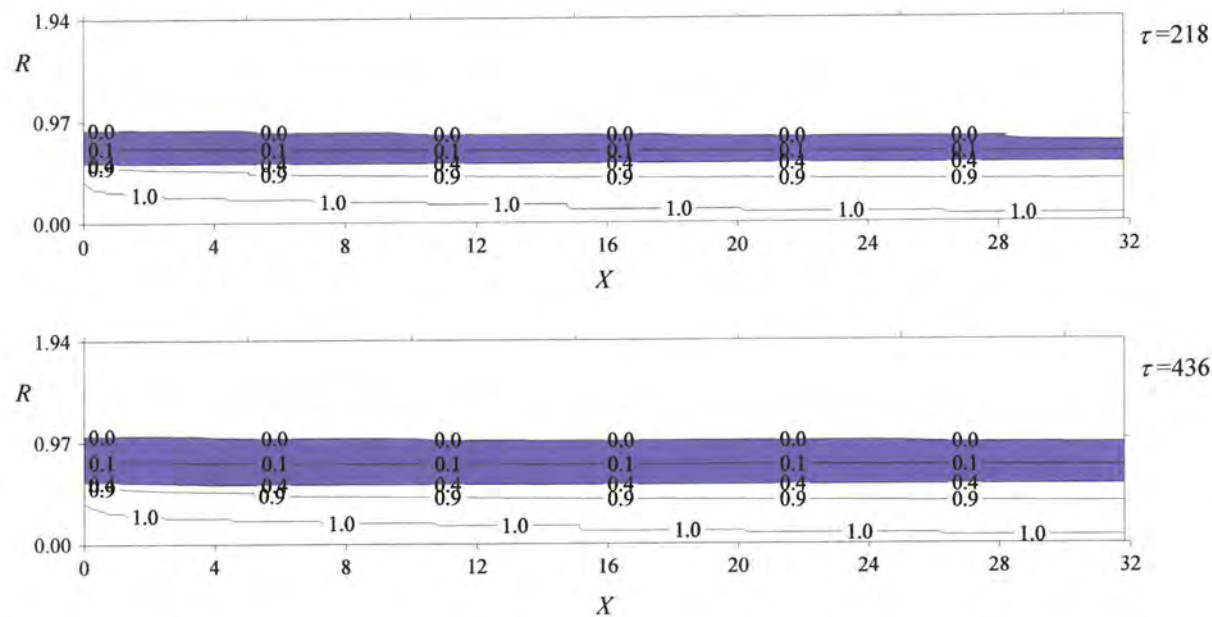
Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slici 59. Područja taljenja i područja kapljevite faze akumulatora topline na slici su označena plavom bojom.



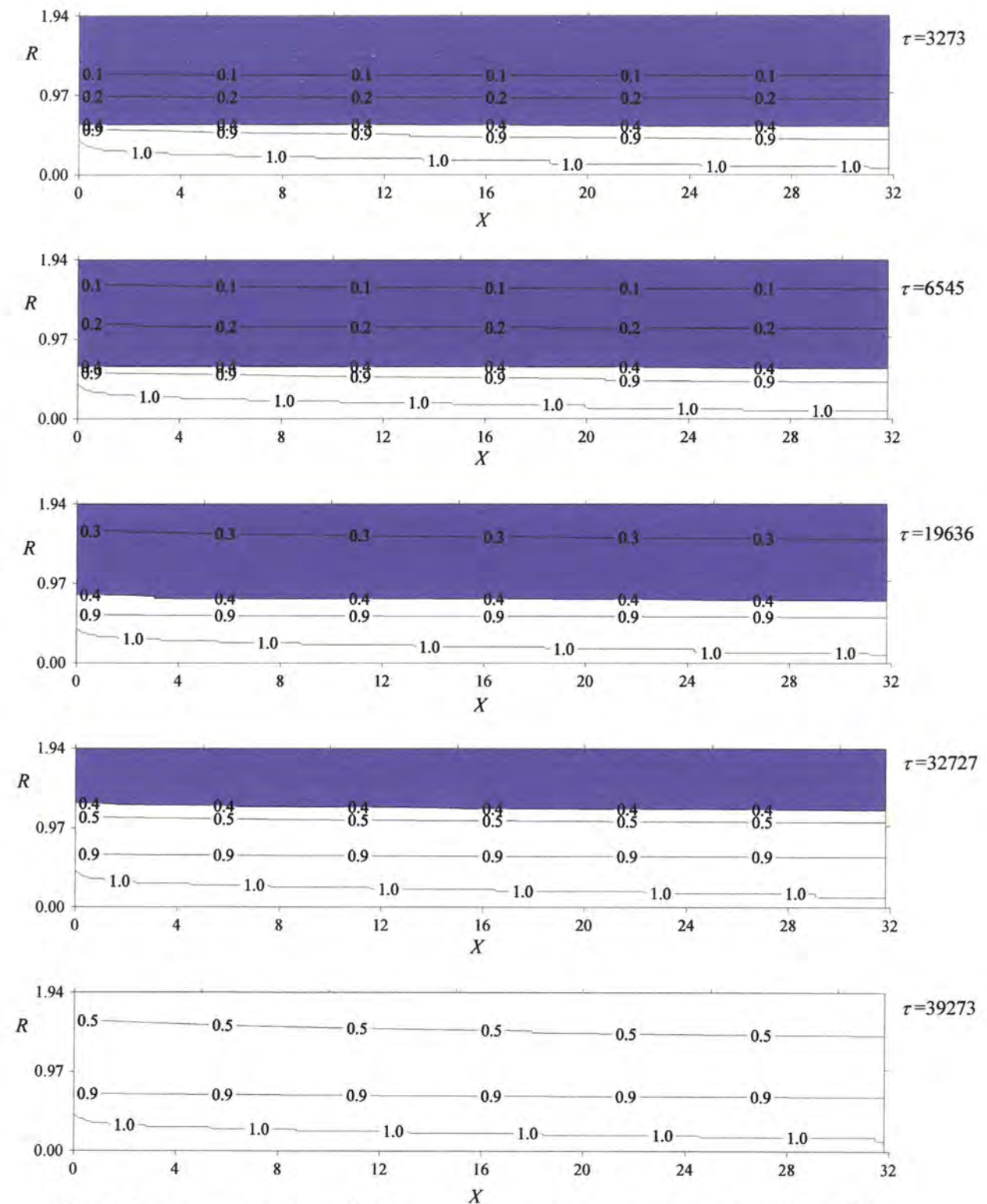
Slika 59. Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,4$

Granice taljenja akumulatora topline pomiču se prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 3273$  ukupna količina akumulatora topline nalazi se u području taljenja.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 60a i 60b. Područja taljenja akumulatora topline na slikama su označena ljubičastom bojom.



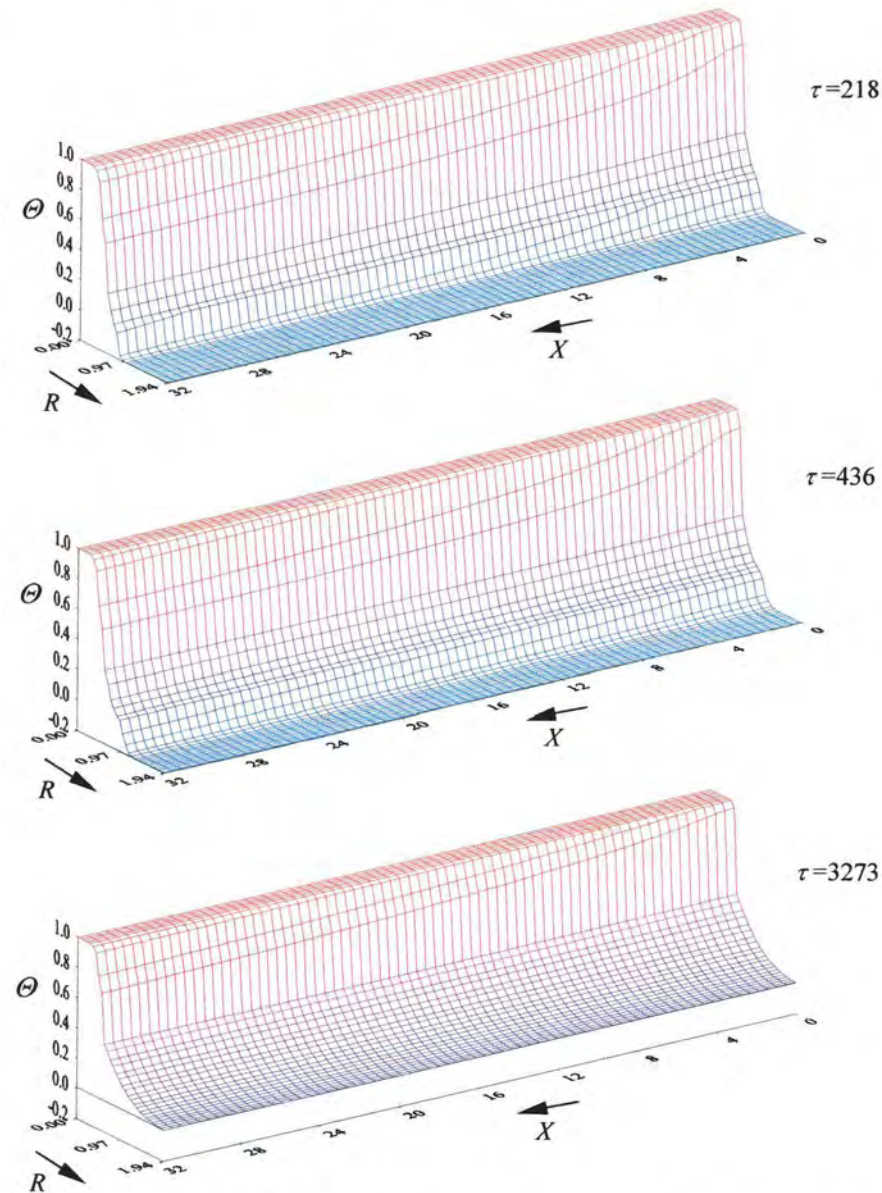
Slika 60a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,4$



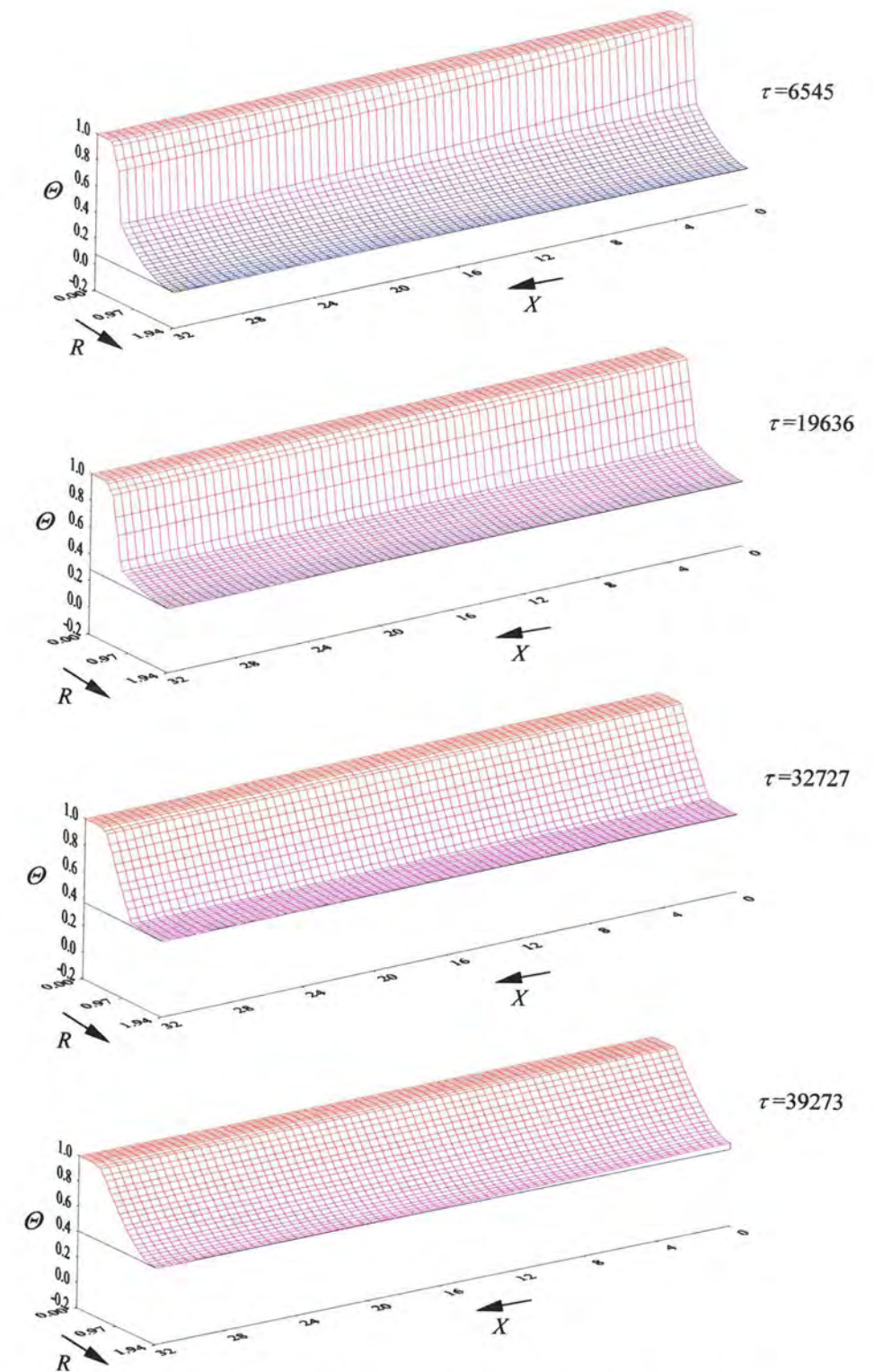
Slika 60b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,4$

Iz dijagrama je vidljivo pomicanje izoterme prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi usporedo s pomicanjem granica taljenja.

Na slikama 61a i 61b prikazane su prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenke cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima.



Slika 61a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,4$



Slika 61b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$  pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala  $0 - 0,4$

Iz prostornih je dijagrama vidljivo pomicanje temperaturnih polja prema gore za vrijeme taljenja i pri zagrijavanju kapljevite faze akumulatora topline po završetku procesa taljenja. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 39273$  potpuno je rastaljena ukupna količina akumulatora topline te se daljnjim dovodenjem topline sprema osjetna toplina kapljevite faze pri čemu njena temperatura raste.

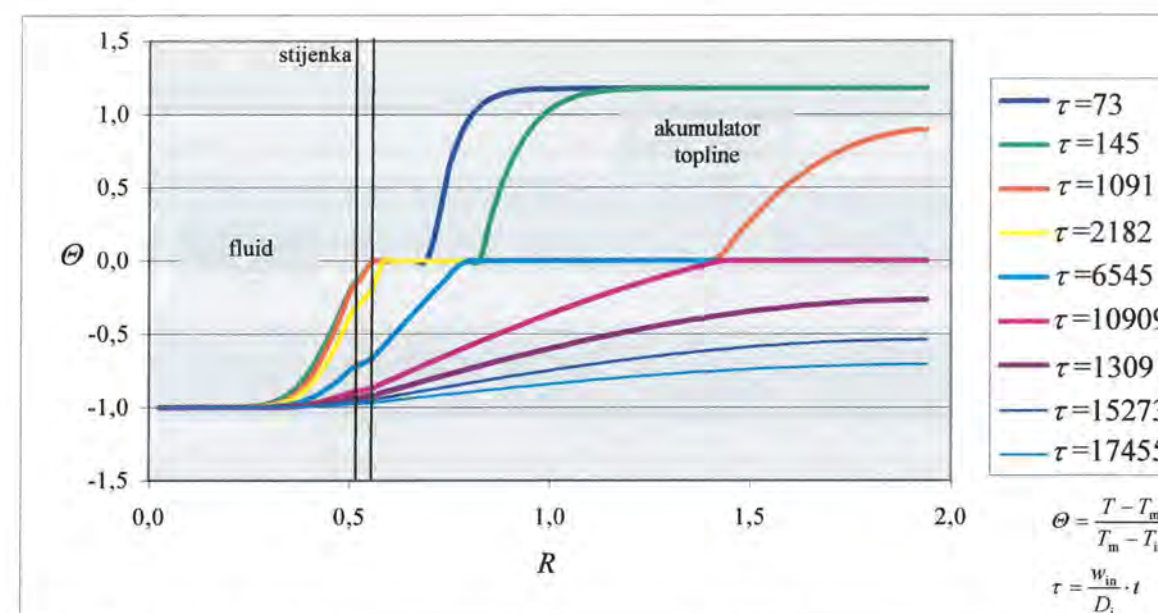
Ukupna spremljena toplina unutar akumulatora topline u vremenu od 6 h iznosi 2,07 MJ, a eksergijska iskoristivost spremnika 0,25.

Usporedbom proračunatih topline spremljenih unutar akumulatora topline za vrijeme procesa taljenja pri konstantnoj temperaturi i unutar zadanog temperaturnog intervala slijedi da je u slučaju promatranja procesa taljenja unutar temperaturnog intervala spremljena toplina nešto manja, što dovodi i do smanjenja eksergijske iskoristivosti spremnika.

### 6.2.3 Proračun temperaturnog polja pri procesu skrućivanja akumulatora topline

Po završetku numeričke analize procesa taljenja izvršen je numerički proračun nestacionarne izmjene topline pri skrućivanju akumulatora topline, provođenju topline kroz stijenku cijevi te prijenosu topline prisilnom konvekcijom između stijenke i fluida pri korištenju spremljene topline. Numeričkim su proračunom dobivena temperaturna polja fluida, stijenke i akumulatora topline u različitim vremenskim intervalima.

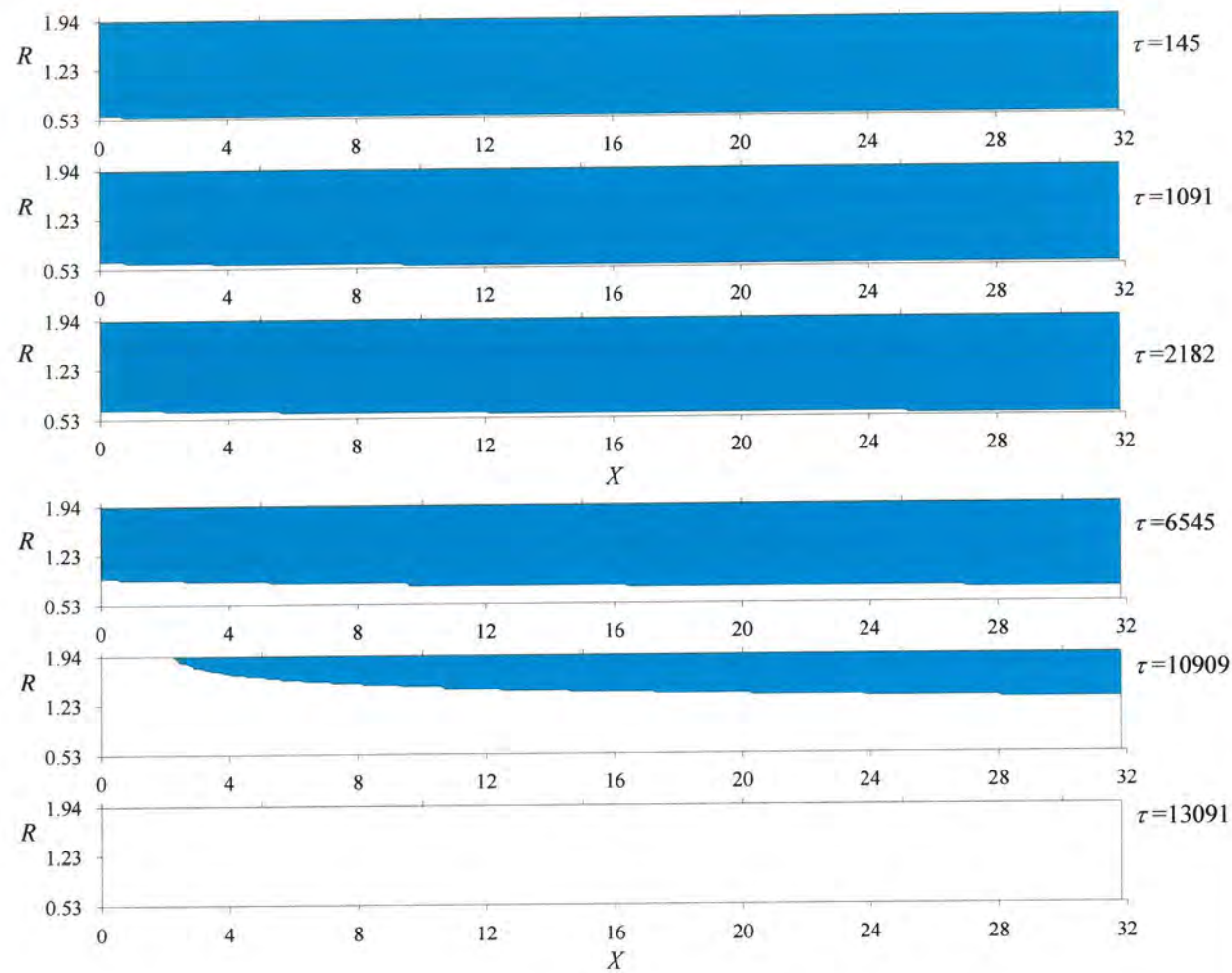
Prvim je proračunom obrađen slučaj masenog protoka fluida od 0,017 kg/s, pri čemu je njegova prosječna ulazna brzina u spremnik iznosila 0,02 m/s. Ulazna temperatura fluida u spremnik iznosila je 286 K. Početno je akumulator topline bio u kapljevitoj fazi s početnom prosječnom temperaturom 318 K. Ukupna predana toplina za vrijeme skrućivanja akumulatora topline iznosila je 2,52 MJ u vremenu od 8 h. Reynoldsova značajka u ovom slučaju iznosi 657, a Stefanova značajka 0,13. Proračunom je dobivena eksergijska iskoristivost spremnika od 0,7. Temperaturna polja dobivena numeričkim proračunom prikazana su u sljedećim dijagramima.



Slika 62. Radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 657$

Na slici 62 prikazana je radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 0,4 \cdot \frac{L}{D_i}$ , tj. na udaljenosti  $X = 12,73$ , od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima. Na dijagramu su označena područja akumulatora topline, stijenke cijevi te fluida. Slično kao i u slučaju procesa taljenja granice skrućivanja u različitim vremenima presjecišta su vrijednosti bezdimenzijske temperature  $\Theta = 0$  i odgovarajućih temperaturnih krivulja. Skrućivanje započinje oko unutarnje cijevi te se širi u unutrašnjost vanjske cijevi u kojoj je smješten akumulator topline. U bezdimenzijskim vremenima  $\tau = 73$ ,  $\tau = 145$  i  $\tau = 1091$  akumulator topline u blizini vanjske površine stijenke unutarnje cijevi dostigao je temperaturu skrućivanja dok je na većim udaljenostima od stijenke cijevi još uvijek u kapljevitoj agregatnoj stanju i vrši se hlađenje kapljevite faze do postizanja temperature skrućivanja. Granica skrućivanja pomiče se sve više prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Iz dijagrama je vidljivo da je u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 2182$  granica skrućivanja došla do unutarnjeg promjera vanjske cijevi tj. sav se akumulator topline nalazi u području skrućivanja. Napredovanjem granice skrućivanja, temperaturne krivulje pomiču se prema dolje. Za  $\tau = 13091$  sav je akumulator topline u krutom agregatnom stanju te hlađenjem krute faze dolazi do snižavanja njegove temperature.

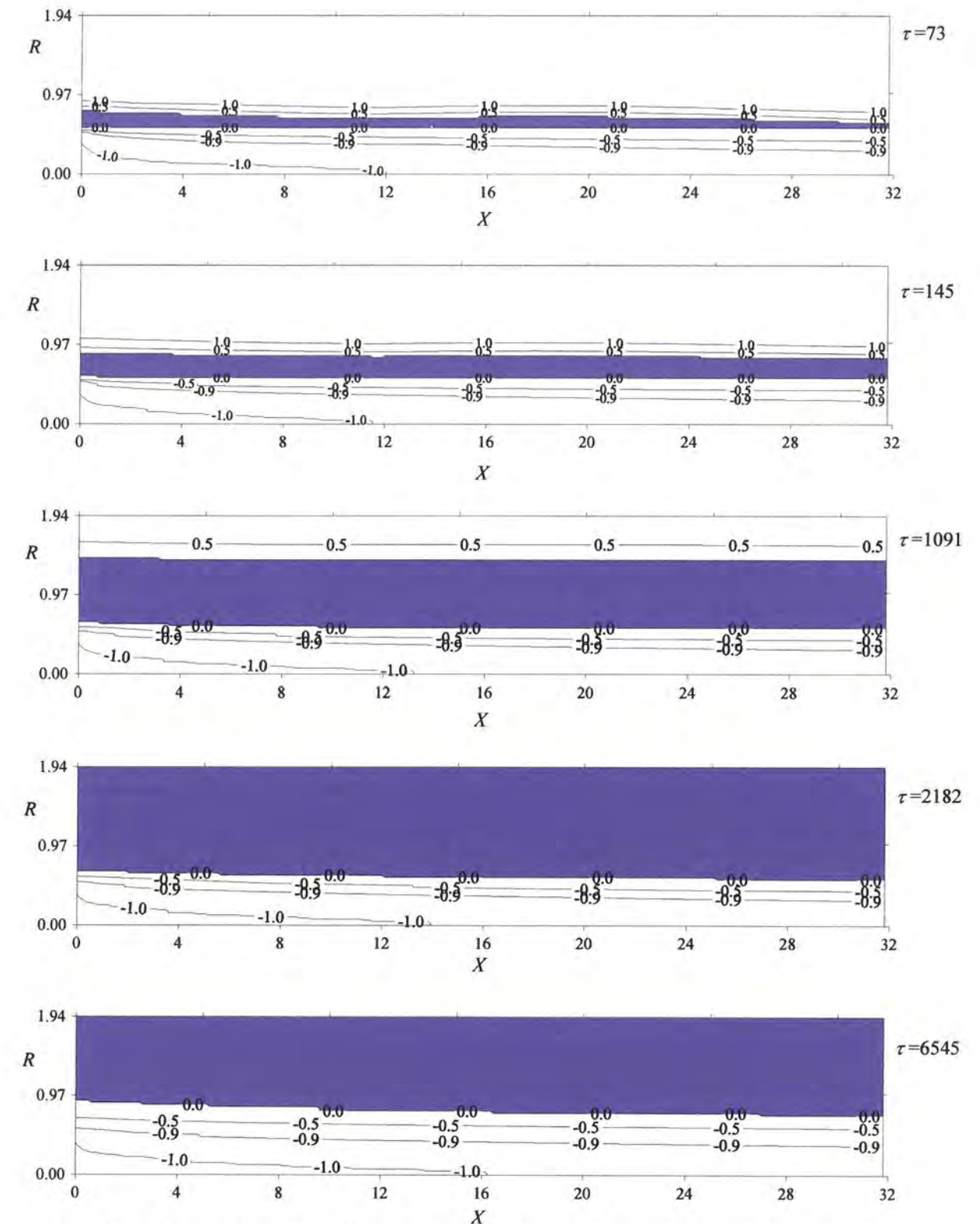
Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slici 63. Područja kapljevite faze akumulatora topline te područja skrućivanja na slici su označena plavom bojom.



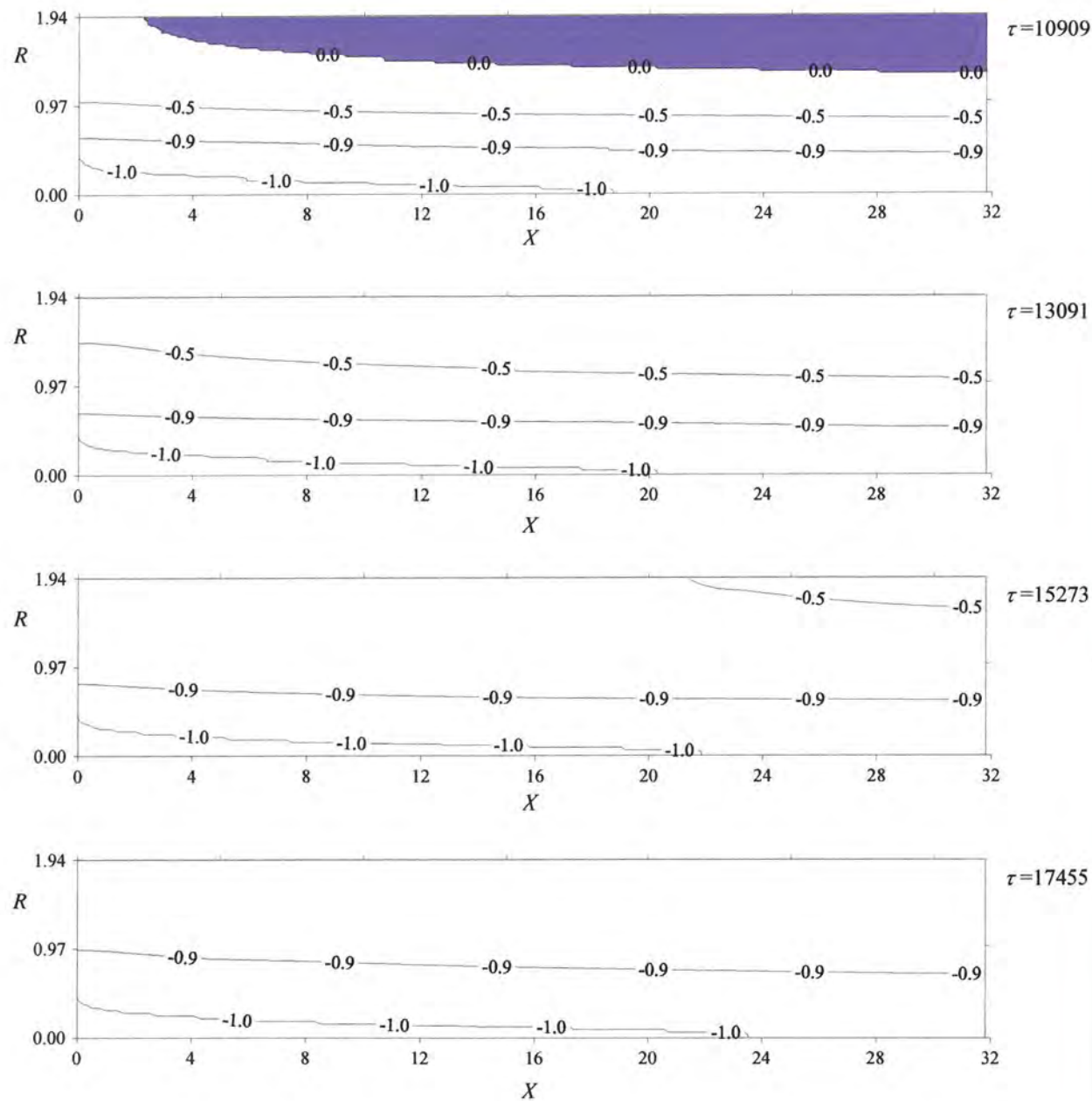
Slika 63. Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

Iz slike 63 vidljivo je da skrućivanje započinje na vanjskoj površini unutarnje cijevi. Granica skrućivanja širi se uz stijenku cijevi od ulaza do izlaza iz spremnika brže nego prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Iz slike je također vidljivo da proces skrućivanja najprije završava na vanjskoj površini unutarnje cijevi, te u tom području dolazi do daljnjeg ohlađivanja krute faze akumulatora topline pri čemu on predaje određenu količinu osjetne topline. U bezdimenzijskom je vremenu  $\tau = 10909$  skrućivanje završeno u poprečnim presjecima u blizini ulaza fluida u spremnik, dok je u bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 13091$  ukupna masa akumulatora topline u krutom agregatnom stanju.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 64a i 64b. Područja skrućivanja akumulatora topline na slikama su označena ljubičastom bojom.



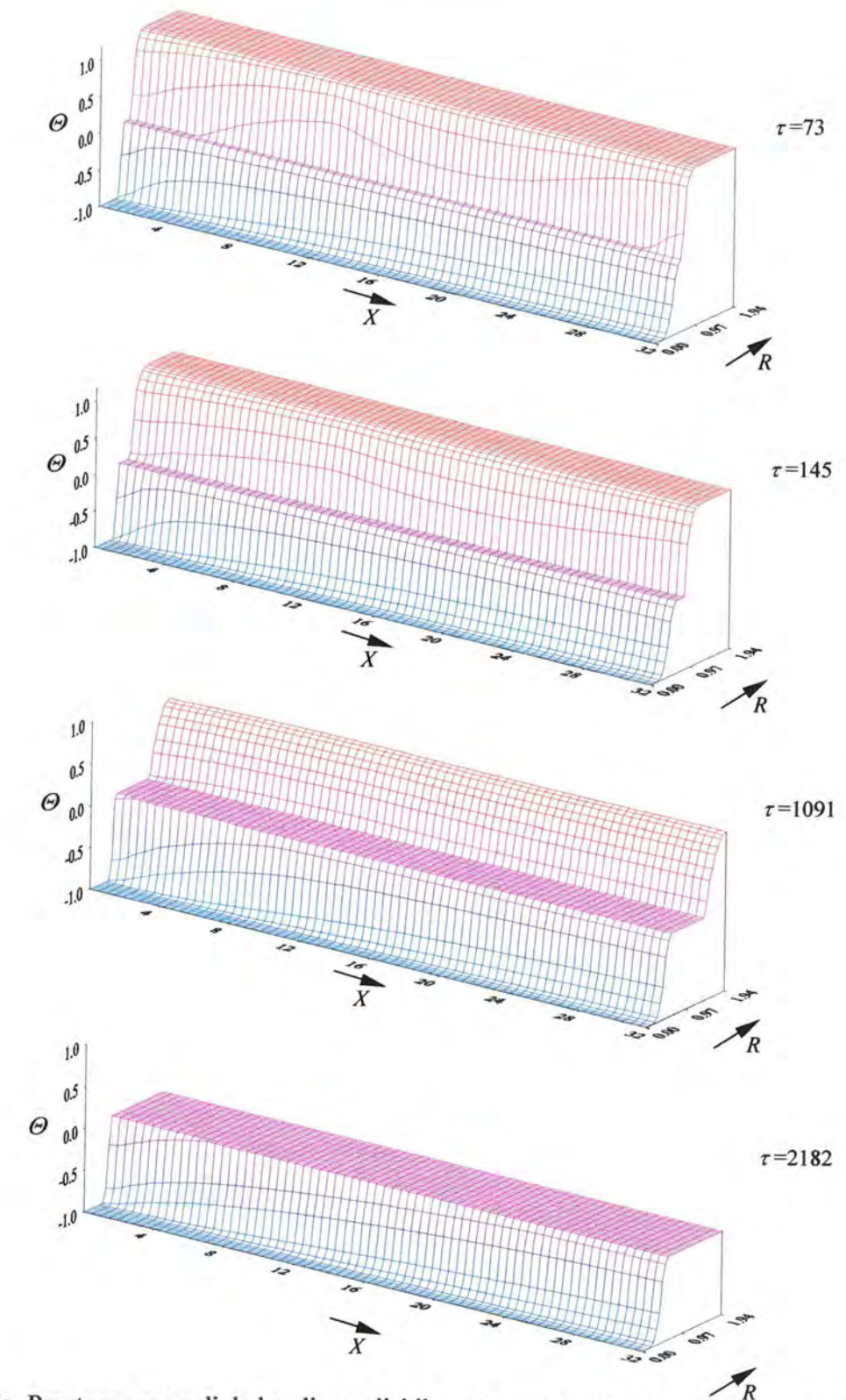
Slika 64a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$



Slika 64b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

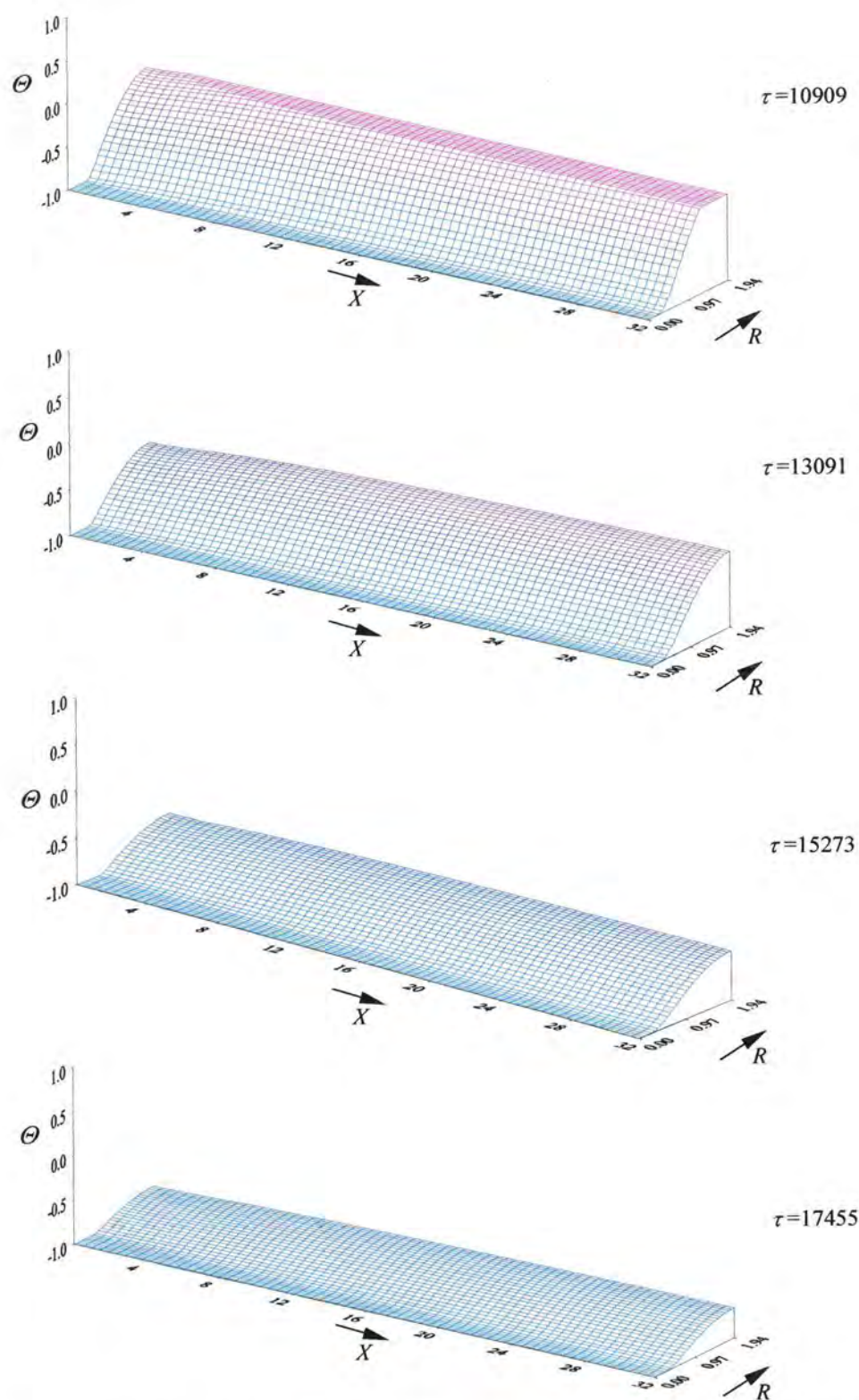
Iz slika 64a i 64b vidljivo je da se širenjem granice skrućivanja izoterme bezdimenzijskih temperatura pomiču sve više prema gore, tj. akumulator topline se hladi i predaje toplinu fluidu.

Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenske cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 65a i 65b.



Slika 65a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

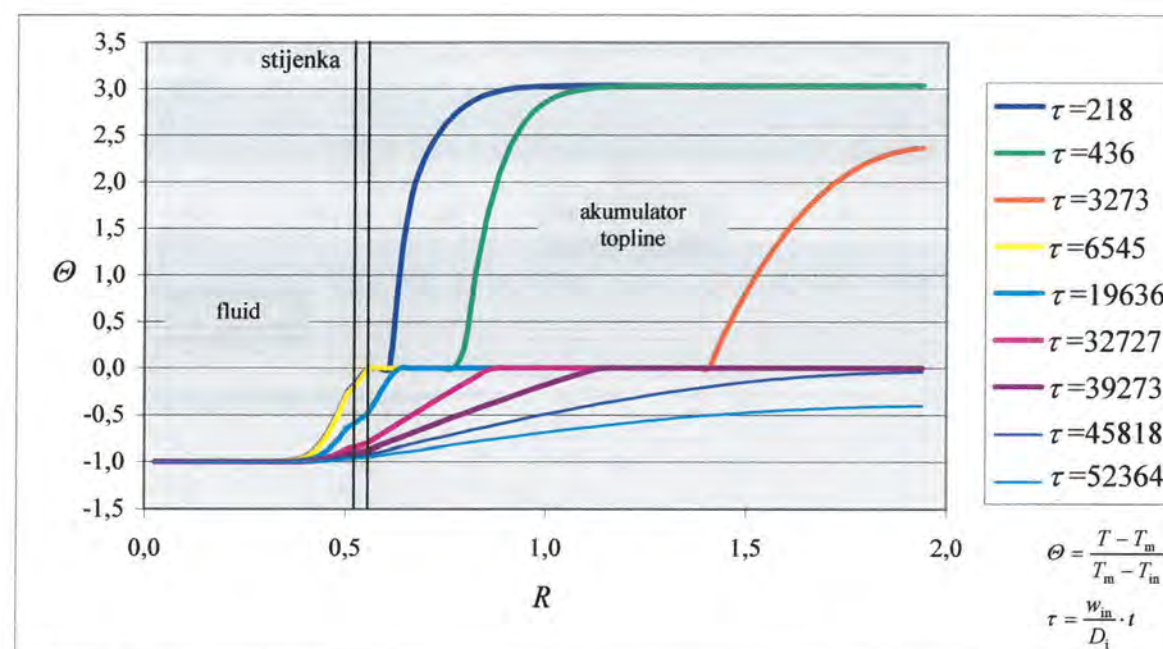




Slika 65b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=657$

Iz prostornih je dijagrama na slikama 65a i 65b vidljivo širenje područja skrućivanja akumulatora topline za vrijeme korištenja topline iz spremnika, te ohlađivanje krute faze po završetku procesa skrućivanja.

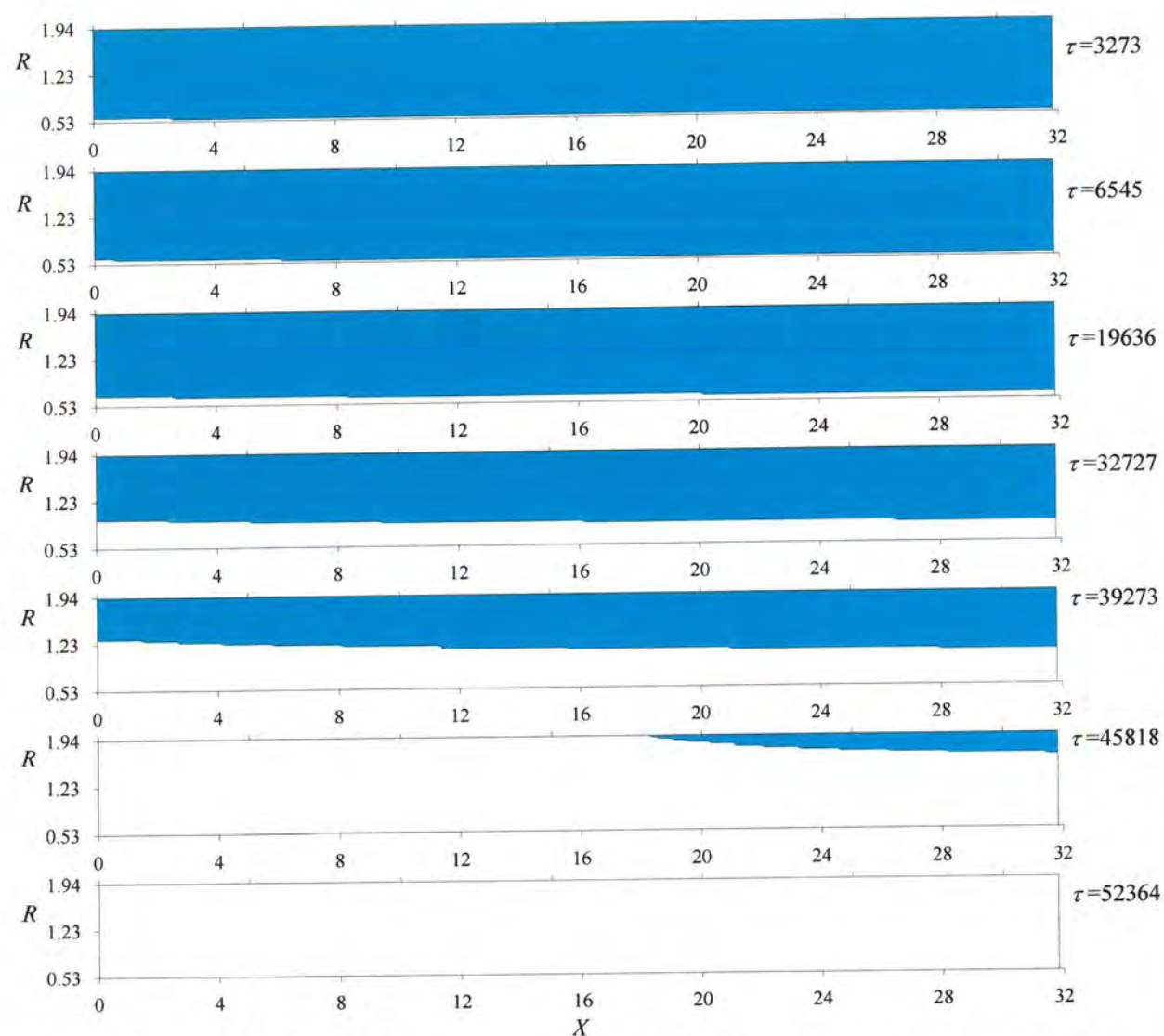
Drugim je proračunom obrađen slučaj prosječne ulazne brzine fluida u spremnik od 0,06 m/s, odnosno masenog protoka od 0,051 kg/s. Ulazna temperatura fluida u spremnik iznosila je 295 K. Prosječna je početna temperatura akumulatora topline, koji je u kapljevitom stanju, bila 318 K. Ukupna predana toplota za vrijeme skrućivanja akumulatora topline iznosila je 2,37 MJ u vremenu od 8 h. Reynoldsova je značajka za ovaj slučaj 1970, a Stefanova značajka 0,05. Proračunom je dobivena eksergijska iskoristivost spremnika od 0,52. Temperaturna polja dobivena numeričkim proračunom prikazana su u sljedećim dijagramima.



Slika 66. Radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re = 1970$

Na slici 66 prikazana je radijalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti  $X = 12,73$  od ulaza u spremnik u različitim vremenskim intervalima. Skrućivanje započinje oko unutarnje cijevi te se širi u unutrašnjost vanjske cijevi u kojoj je smješten akumulator topline. U bezdimenzijskom vremenu  $\tau = 52364$  sav je akumulator topline u krutom agregatnom stanju te dolazi do ohlađivanja krute faze.

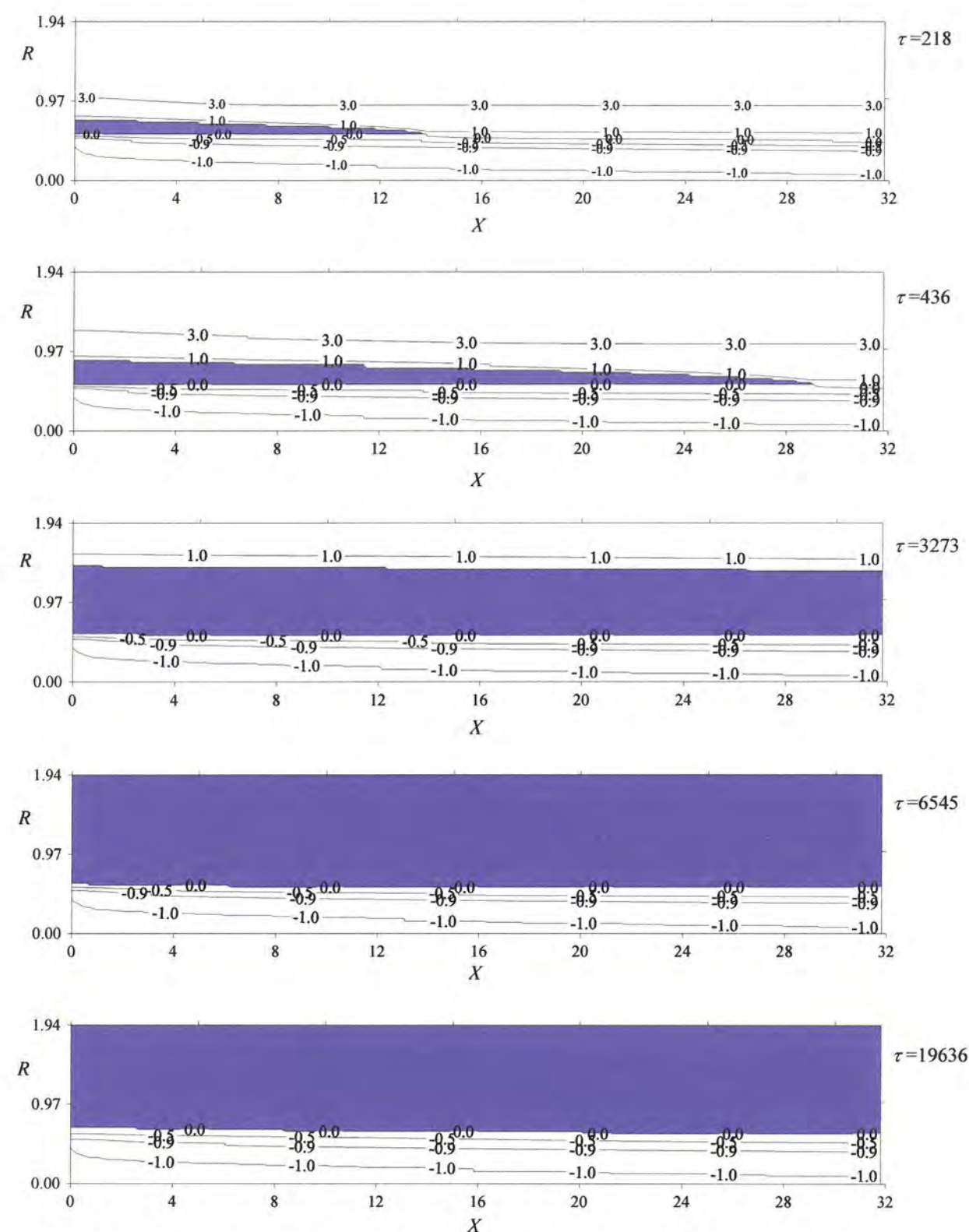
Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slici 67. Područja kapljevite faze akumulatora topline te područja skrućivanja na slici su označena plavom bojom.



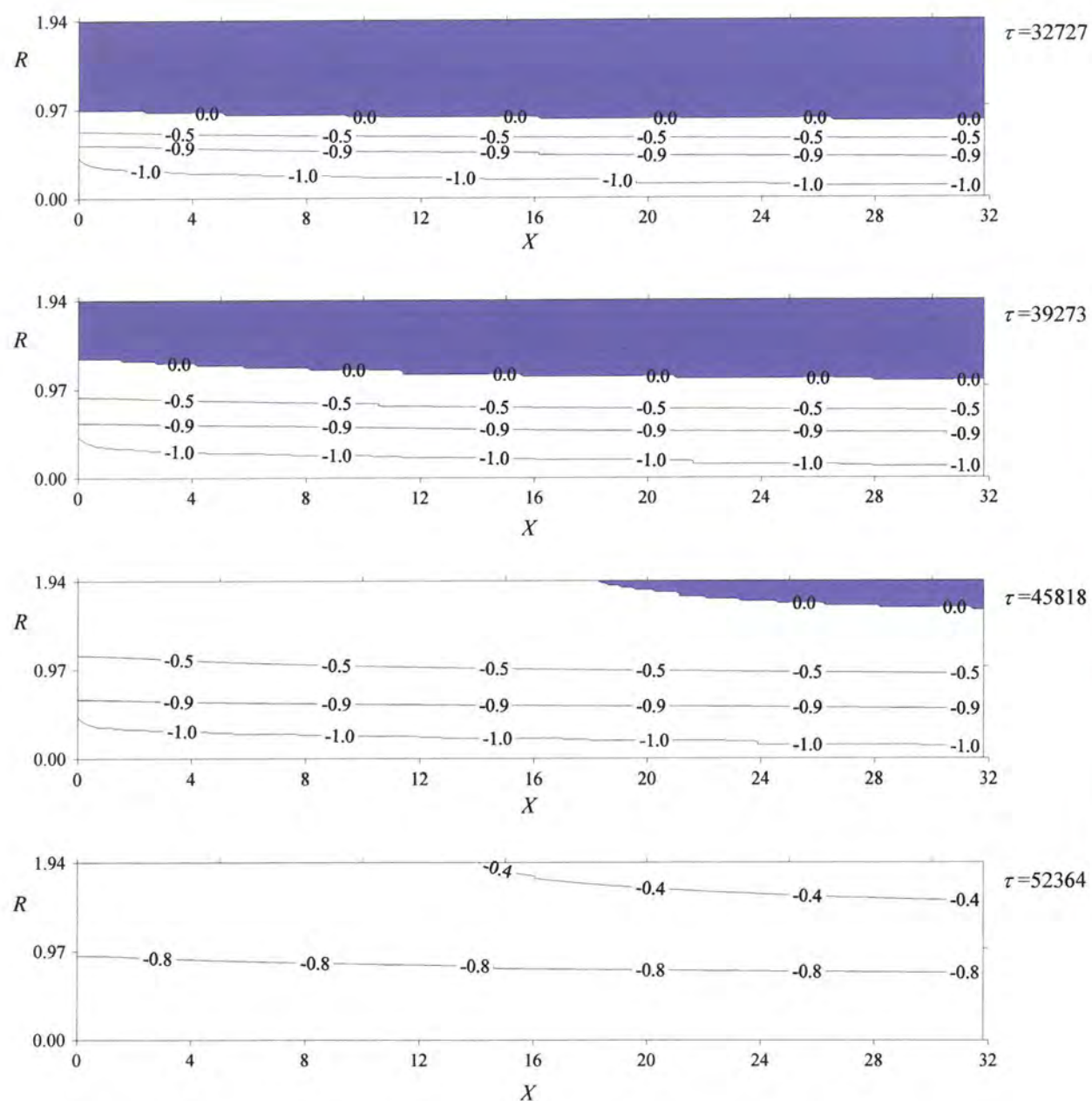
Slika 67. Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$

Područje skrućivanja širi se prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. U bezdimenzijskom je vremenu  $\tau = 45818$  akumulator topline već gotovo u potpunosti u krutom agregatnom stanju. Skrućivanje se vrši još jedino u području uz unutarnji promjer vanjske cijevi u blizini izlaza fluida iz spremnika.

Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 68a i 68b. Područja skrućivanja akumulatora topline na slikama su označena ljubičastom bojom.



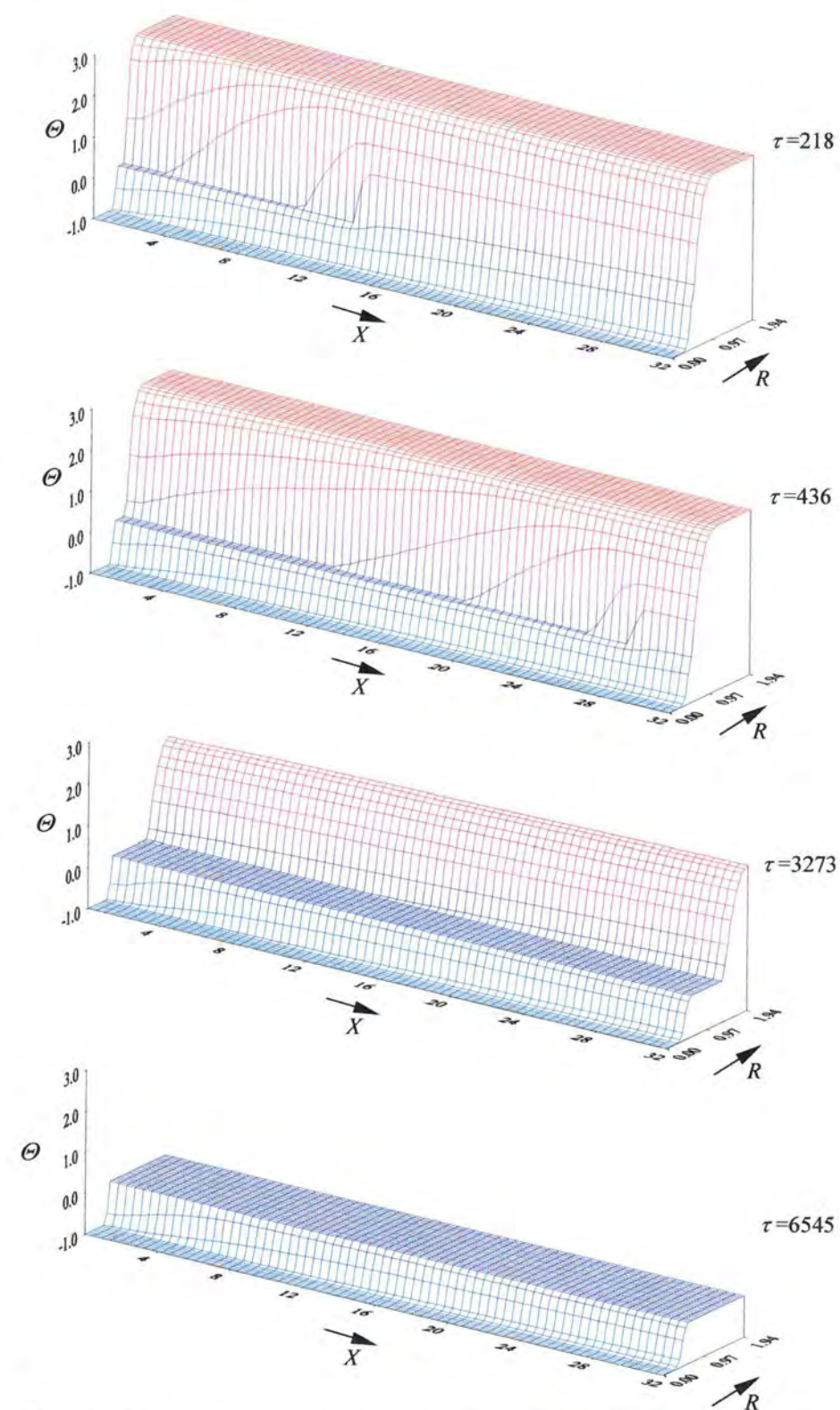
Slika 68a. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$



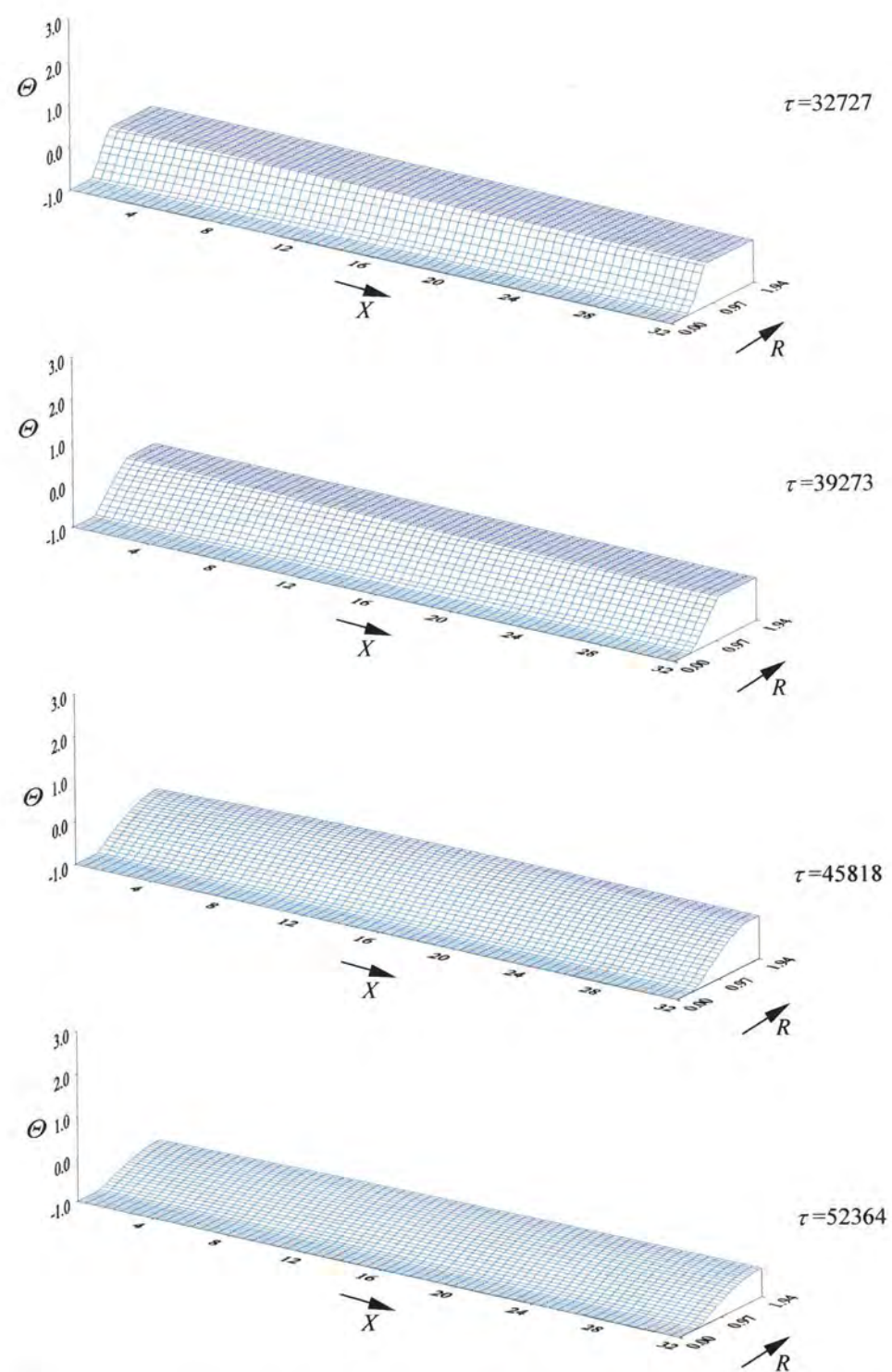
Slika 68b. Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$

Iz slika 68a i 68b vidljivo je pomicanje područja skrućivanja i izoterme bezdimenzijskih temperatura prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi.

Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura fluida, stijenke cijevi i akumulatora topline unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima prikazane su na slikama 69a i 69b.



Slika 69a. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$



Slika 69b. Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za  $Re=1970$

Iz prostornih je dijagrama na slikama 69a i 69b vidljivo pomicanje područja skrućivanja prema izlaznom presjeku, a zatim i prema unutarnjem promjeru vanjske cijevi. Iz dijagrama je vidljivo i pomicanje temperaturnih polja akumulatora topline prema dolje prilikom odavanja osjetne topline kapljevite faze pri ohlađivanju do temperature skrućivanja te osjetne topline krute faze po završetku procesa skrućivanja.

## 7 Analiza utjecaja pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na karakteristike latentnog spremnika

U nastavku istraživanja izvršen je niz numeričkih proračuna u svrhu određivanja utjecaja raznih pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na toplinsko ponašanje odnosno izmjenu topline unutar latentnog spremnika. Pri tome je analiziran utjecaj brzine strujanja i ulazne temperature fluida, duljine i vanjskog radijusa spremnika te vremena taljenja i skrućivanja. Za proces taljenja analiziran je utjecaj ulaznih brzina fluida od 0,03 do 0,06 m/s s pripadnim Reynoldsovim značajkama od 1000 do 2000, ulaznih temperatura fluida od 318 do 328 K s pripadnim razlikama temperatura između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline od 18 do 23 K, bezdimenzijskih duljina cijevi od 20 do 100, bezdimenzijskih radijusa od 1,2 do 1,8 te vremena taljenja od 4 do 8 sati. Za proces skrućivanja analiziran je utjecaj ulaznih brzina fluida od 0,01 do 0,06 m/s s pripadnim Reynoldsovim značajkama od 330 do 2000, ulaznih temperatura fluida od 278 do 293 K s pripadnim razlikama temperatura između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida od 22 do 7 K, bezdimenzijskih duljina cijevi od 20 do 100, bezdimenzijskih radijusa od 1,2 do 2 te vremena skrućivanja od 4 do 8 sati. Svi su numerički proračuni izvršeni za mrežu kontrolnih volumena i vremenski korak sličnih vrijednosti onima za usporedbu rezultata numeričkog i eksperimentalnog istraživanja. Dobiveni su rezultati analize dani u nastavku.

### 7.1 Utjecaj brzine strujanja fluida na izmjenu topline u latentnom spremniku

#### 7.1.1 Taljenje akumulatora topline

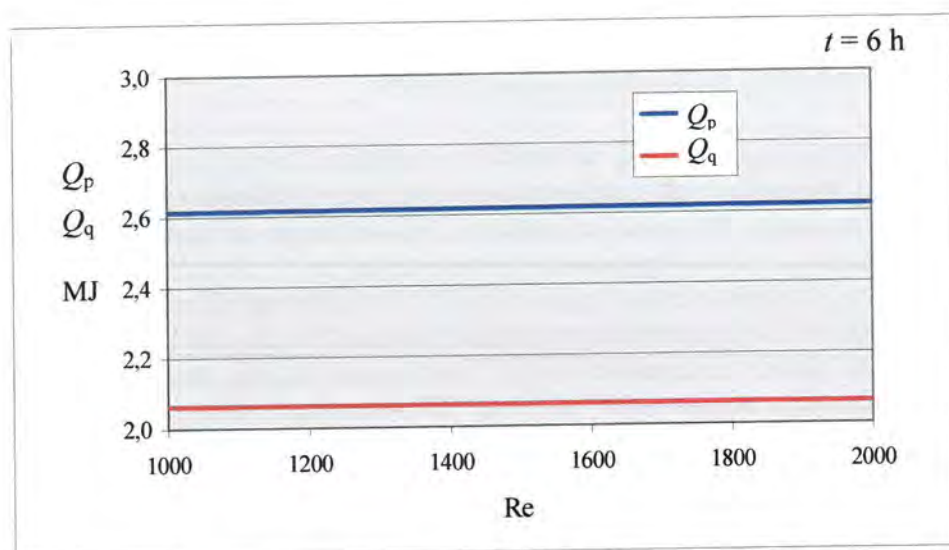
U ovom je poglavlju prikazana analiza utjecaja brzine strujanja fluida na toplinsko ponašanje latentnog spremnika pri procesu spremanja topline. Pri tome je analiziran utjecaj brzine strujanja fluida na ukupnu spremljenu toplinu unutar akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , spremljenu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora

topline označen s  $f$ , a definiran kao  $f = \frac{Q_p}{Q_q}$  te na eksergijsku iskoristivost spremnika. Kao

akumulator topline promatran je parafin RT 30, a fluid je bila voda. Ulazna temperatura fluida u spremnik iznosila je 323 K. Akumulator topline je početno u krutom agregatnom stanju početne temperature 293 K. Bezdimenzijske vrijednosti konstrukcijskih parametara spremnika su

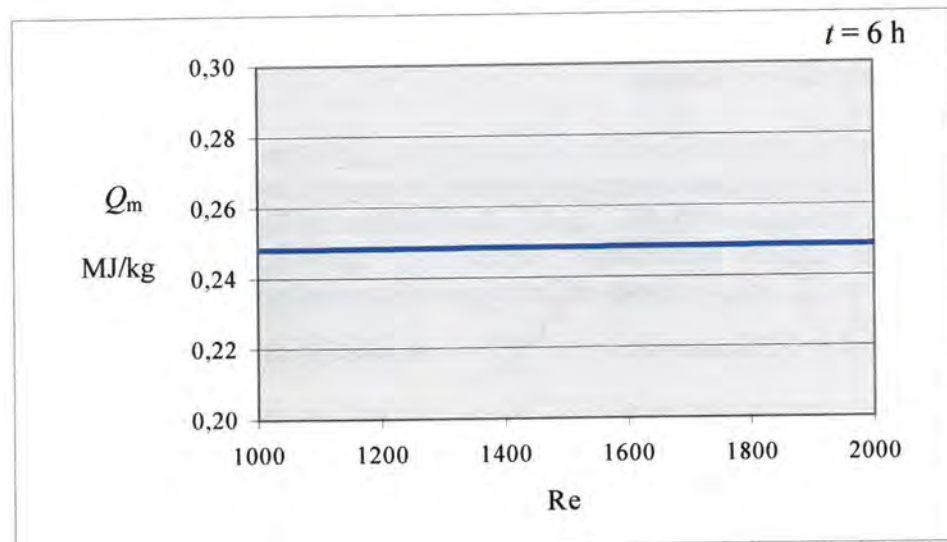
sljedeće: bezdimenzijska duljina  $L/D_i = 40$  i bezdimenzijski radijus vanjske cijevi  $r_o/D_i = 1,8$ .

Ukupno vrijeme taljenja iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćene promjene brzina strujanja fluida od 0,03 do 0,06 m/s s pripadnim Reynoldsovim značajkama 1000 do 2000 kako bi strujanje unutar cijevi bilo laminarno. Dobiveni su rezultati prikazani u sljedećim dijagramima.



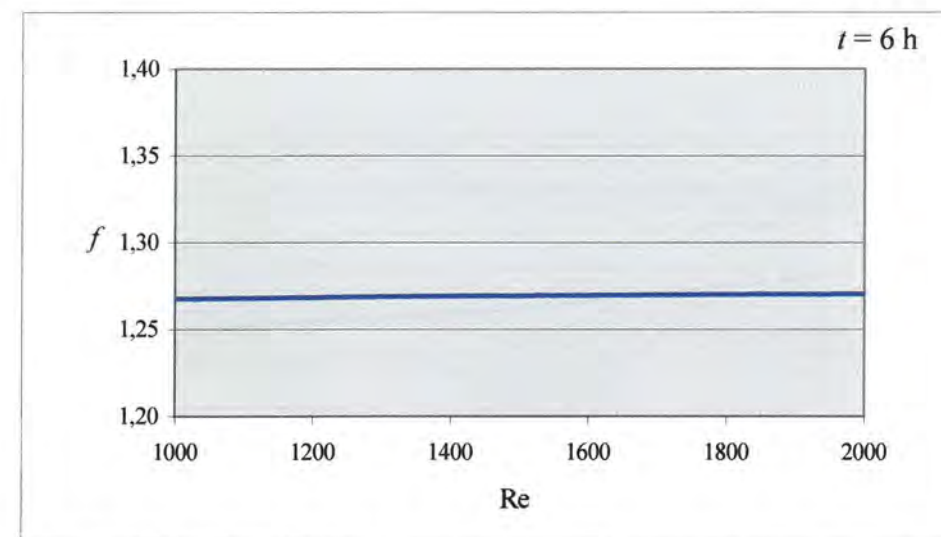
Slika 70. Utjecaj Re na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz dijagrama je vidljivo da brzina strujanja fluida ima vrlo mali utjecaj na količinu ukupne spremljene topline unutar spremnika za vrijeme procesa taljenja akumulatora topline u promatranom području laminarnog strujanja fluida. Promjenom protoka fluida vrlo se malo može utjecati na ukupnu količinu spremljene topline u zadanom vremenu.



Slika 71. Utjecaj Re na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

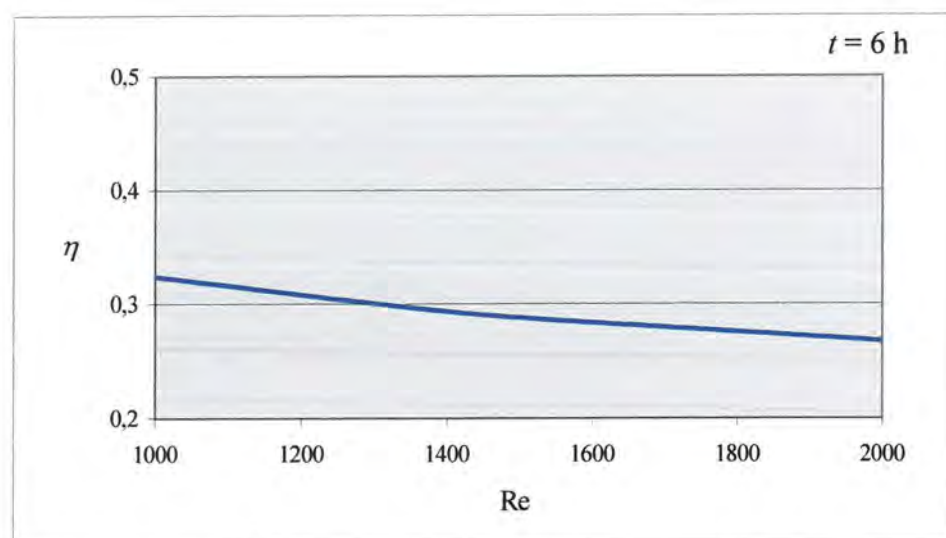
Specifična toplina tj. spremljena toplina po jedinici mase akumulatora topline mijenja se neznatno s promjenom brzine pri laminarnom strujanju fluida budući da se vrlo malo mijenja i ukupna spremljena količina topline u latentnom spremniku.



Slika 72. Utjecaj Re na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja

Omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline za zadane početne uvjete iznosi oko 1,27 i neznatno raste s porastom brzine strujanja fluida. Da bi se prijelaz topline unutar latentnog spremnika odvijao što više izotermno potrebno je da ovaj omjer topline bude što bliže vrijednosti 1. Budući da je akumulator topline početno na temperaturi koja je niža od temperature taljenja akumulatora topline ovaj je omjer pri zadanim uvjetima nešto veći od 1 što znači da se sprema i određena količina osjetne topline akumulatora topline.

Iz prethodnih je dijagrama na slikama 70, 71 i 72 vidljivo da se povećanjem brzine strujanja fluida kroz spremnik vrlo malo može utjecati na povećanje ukupne količine spremljene topline unutar spremnika. Razlog je tome što je promatrano strujanje fluida s malim koeficijentom vodljivosti topline pa se velika količina topline prenosi u smjeru struje fluida, a mala se količina topline predaje akumulatoru topline poprečno na smjer struje fluida.



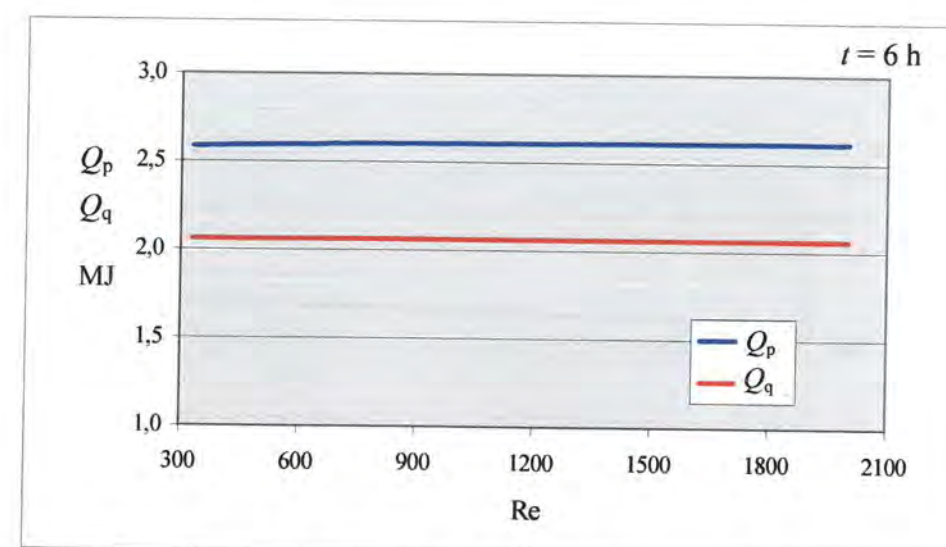
Slika 73. Utjecaj Re na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline

Iz slike 73 vidljivo je da se s porastom brzine strujanja fluida smanjuje eksergijska iskoristivost spremnika pri procesu taljenja akumulatora topline. Naime, porastom brzine strujanja fluida povećava se količina eksergije koja strujanjem fluida ulazi u spremnik te eksergija fluida na izlazu iz spremnika, kao i razlika ovih eksergija, tj. predana eksergija od strane fluida. Eksergija akumulirana unutar akumulatora topline i eksergija akumulirana u fluidu koji se nalazi unutar spremnika također se povećavaju s porastom brzine strujanja, međutim taj je porast sporiji od porasta predane eksergije fluida. Ovo uzrokuje smanjenje eksergijske iskoristivosti spremnika s porastom brzine strujanja fluida, budući da je eksergijska iskoristivost pri procesu taljenja definirana kao omjer između eksergije akumulirane unutar spremnika i predane eksergije fluida.

### 7.1.2 Skrućivanje akumulatora topline

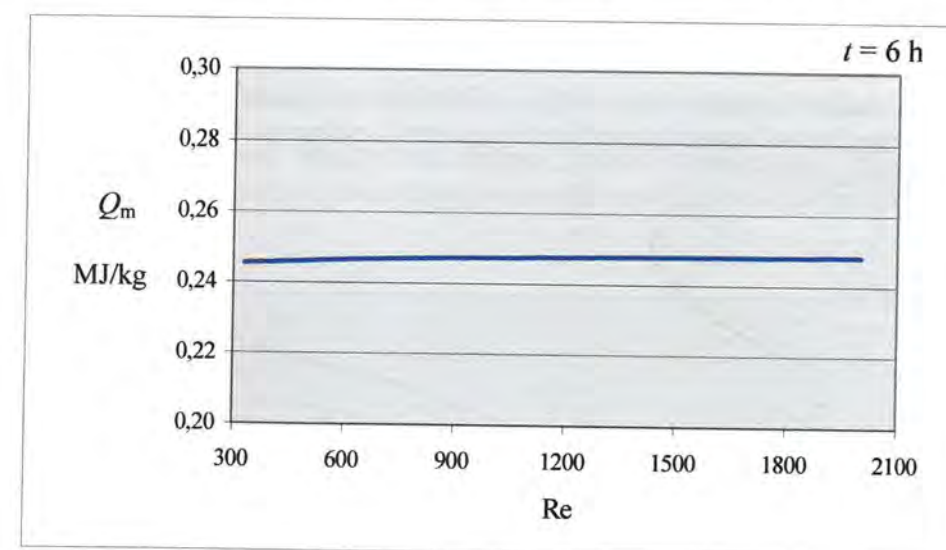
Utjecaj brzine strujanja fluida na toplinsko ponašanje latentnog spremnika analiziran je i za proces korištenja spremljene topline. Pri tome je, kao i kod procesa taljenja, analiziran utjecaj brzine strujanja fluida na ukupnu predanu toplinu od strane akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , predanu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je voda ulazne temperatura 283 K. Akumulator topline je parafin RT 30 u kapljevitom agregatnom stanju početne temperature 313 K. Bezdimenzijske vrijednosti konstrukcijskih parametara iste su kao i kod procesa taljenja i imaju sljedeće vrijednosti: bezdimenzijska duljina  $L/D_i = 40$  i bezdimenzijski radijus vanjske

cijevi  $r_o/D_i = 1,8$ . Ukupno vrijeme skrućivanja akumulatora topline iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćene promjene brzina strujanja fluida od 0,01 do 0,06 m/s s pripadnim Reynoldsovima značajkama 330 do 2000. Strujanje fluida kroz cijev je laminarno. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim dijagramima.



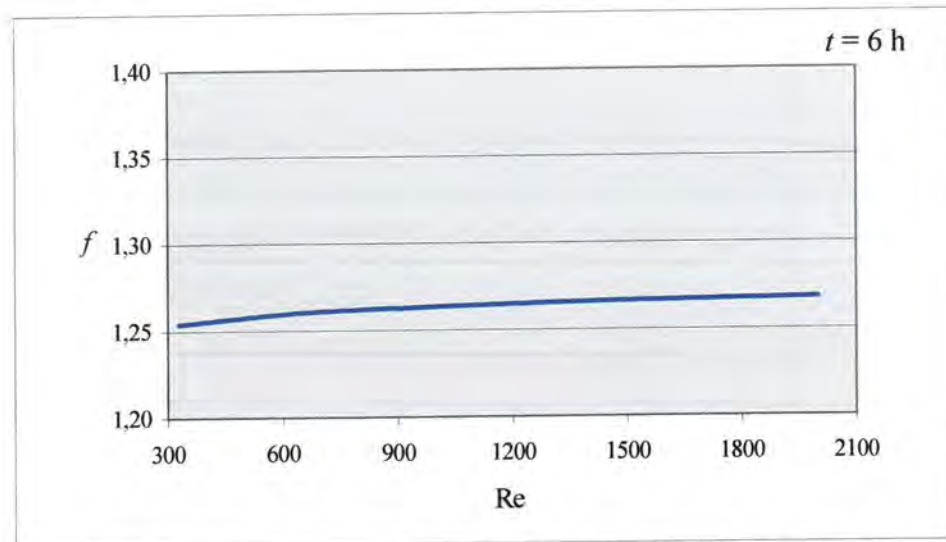
Slika 74. Utjecaj Re na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Slično kao i pri procesu taljenja akumulatora topline iz dijagrama na slici 74 vidljivo je da brzina strujanja kod laminarnog strujanja fluida pri procesu skrućivanja akumulatora topline ima vrlo mali utjecaj na količinu ukupne predane topline od strane akumulatora topline.



Slika 75. Utjecaj Re na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

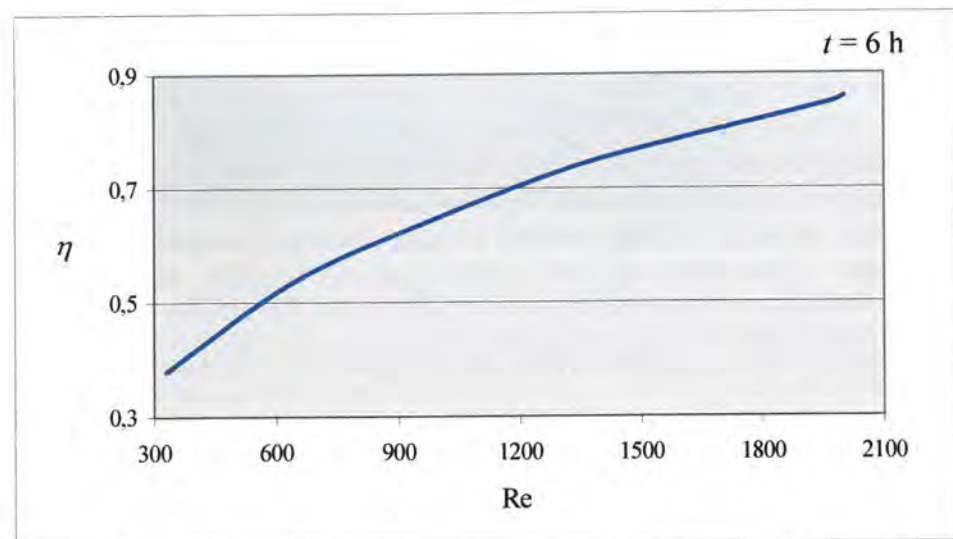
Specifična predana toplina odnosno toplina po jedinici mase akumulatora topline neznatno se povećava s povećanjem brzine strujanja fluida jer je i porast ukupne predane topline vrlo mali.



Slika 76. Utjecaj Re na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 76 vidljivo je da omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja ipak raste, što znači da i količina ukupne predane topline raste, ali vrlo sporo, s porastom brzine strujanja fluida budući da latentna toplina akumulatora topline ne ovisi o pogonskim uvjetima spremnika.

Kao i u slučaju procesa spremanja topline iz slika 74, 75 i 76 vidljivo je da se povećanjem brzine strujanja fluida s malim koeficijentom vodljivosti topline vrlo malo može utjecati na povećanje ukupne predane topline od strane akumulatora topline tj. na povećanje ukupne količine topline koju na sebe preuzima fluid.



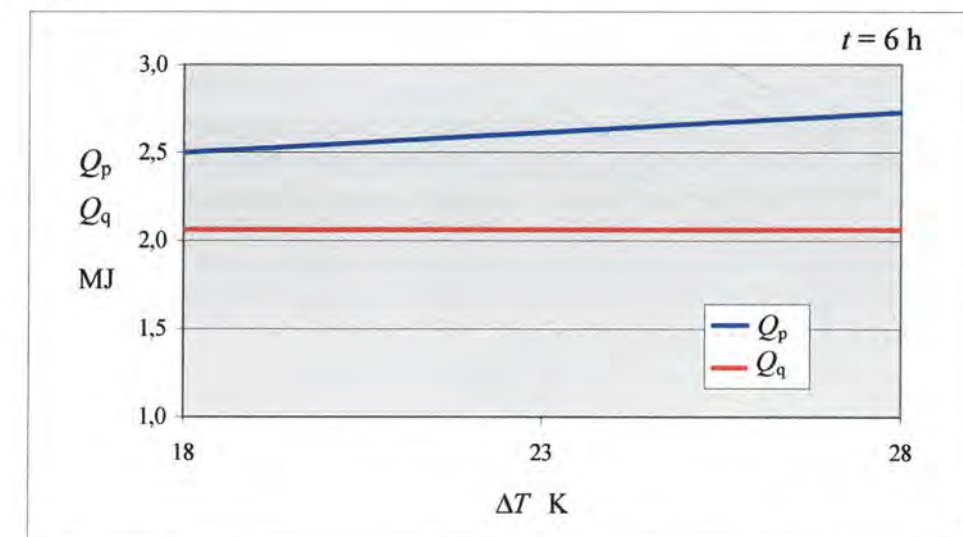
Slika 77. Utjecaj Re na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline

Iz dijagrama je vidljivo da se s porastom brzine strujanja fluida povećava eksergijska iskoristivost latentnog spremnika pri procesu korištenja topline, definirana kao omjer predane eksergije fluidu i početno spremljene eksergije unutar akumulatora topline. Razlog je tome što se povećanjem brzine strujanja fluida povećava eksergija fluida na izlazu i eksergija fluida na ulazu u spremnik kao i njihova razlika, tj. eksergija predana fluidu. Ovo uzrokuje povećanje eksergijske iskoristivosti spremnika pri procesu skrućivanja akumulatora topline s porastom brzine strujanja fluida.

## 7.2 Utjecaj ulazne temperature fluida na izmjenu topline u latentnom spremniku

### 7.2.1 Taljenje akumulatora topline

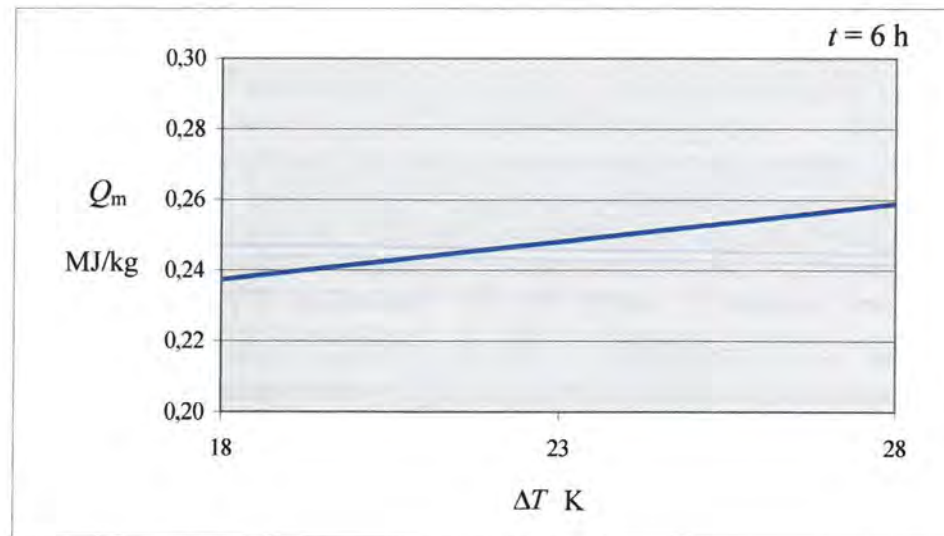
Od pogonskih uvjeta navedenom je numeričkom analizom analiziran i utjecaj ulazne temperature fluida na izmjenu topline u latentnom spremniku pri procesu spremanja topline. Pri tome je analiziran utjecaj temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline na ukupnu spremljenu toplinu unutar akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenu taljenja, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , spremljenu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je u provedenoj analizi voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s. Kao akumulator topline korišten je parafin RT 30. Akumulator topline je početno u krutom agregatnom stanju početne temperature 293 K. Bezdimenzijska duljina spremnika iznosi  $L/D_i = 40$ , a bezdimenzijski radijus vanjske cijevi  $r_o/D_i = 1,8$ . Analizom su obuhvaćena područja temperaturnih razlika između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline od 18 do 28 K. Ukupno vrijeme taljenja iznosilo je 6 h. Dobiveni su rezultati prikazani u sljedećim dijagramima.



Slika 78. Utjecaj temperaturne razlike na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

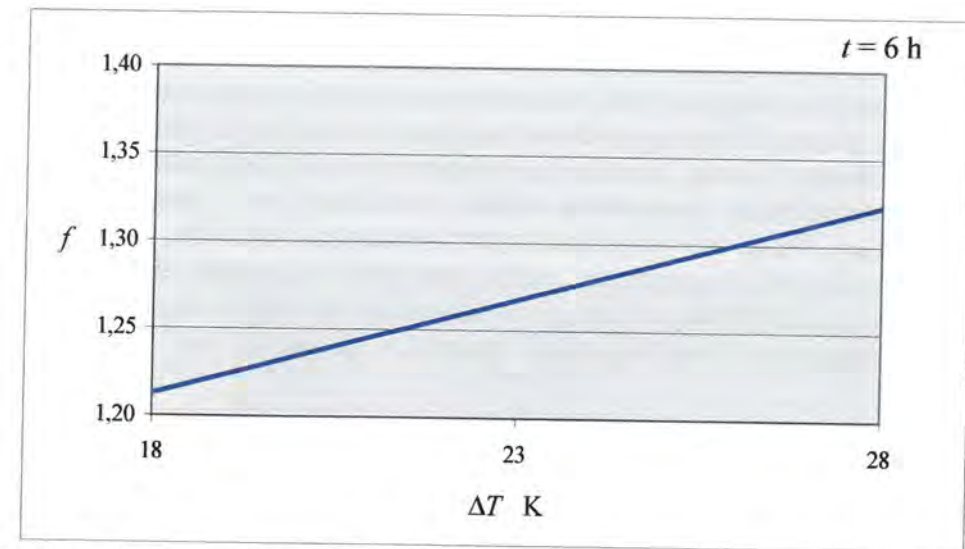


Iz slike 78 vidljivo je da ukupna spremljena toplota unutar akumulatora topline raste s porastom ulazne temperature fluida, odnosno s porastom temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline. Porast ukupne spremljene topline pri procesu taljenja akumulatora topline nije velik. Međutim, usporedbom s porastom ukupne spremljene topline s promjenom prethodno razmatranog pogonskog uvjeta, tj. ulazne brzine fluida, vidljivo je da je povećanjem ulazne temperature fluida pri razmatranim uvjetima taj porast veći. Povećanjem temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline moguće je utjecati na količinu spremljene topline unutar latentnog spremnika zadanih dimenzija. Porast temperaturne razlike moguće je postići povećanjem ulazne temperature fluida, ali i smanjenjem temperature taljenja akumulatora topline tj. njegovim prikladnim odabirom. Latentna toplota akumulatora topline nije ovisna o pogonskim uvjetima te promjenom temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline ostaje nepromijenjena.



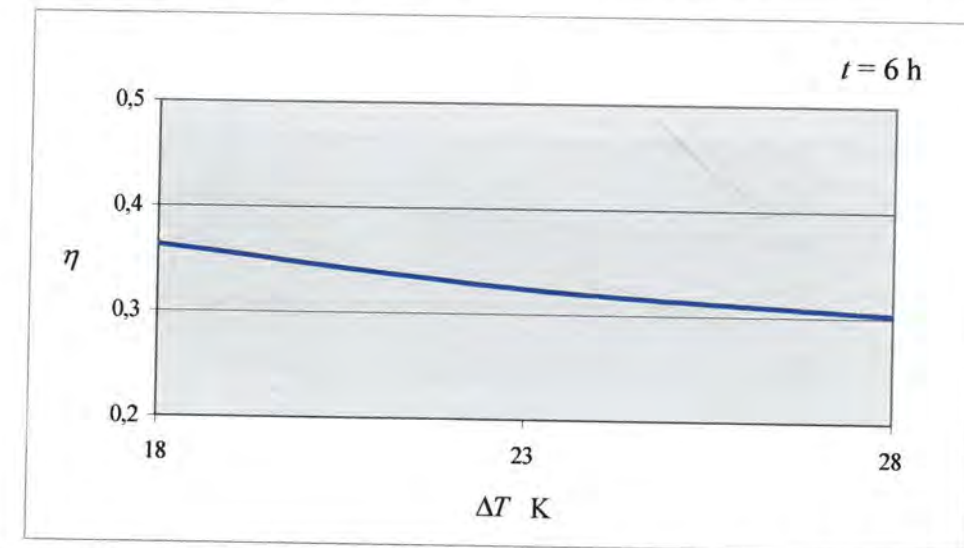
Slika 79. Utjecaj temperaturne razlike na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Budući da se s povećanjem temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline povećava ukupna količina spremljene topline unutar latentnog spremnika, povećava se i spremljena toplota po jedinici mase akumulatora topline što je vidljivo iz slike 79.



Slika 80. Utjecaj temperaturne razlike na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz slike 80 vidljivo je da omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline raste s porastom temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline. Povećanjem spomenute temperaturne razlike kapljevita se faza akumulatora topline nakon završenog procesa taljenja grije na višu temperaturu čime se sprema veća količina osjetne topline pa je i  $f$  veći. Promjenom temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline moguće je utjecati na količinu spremljene topline unutar spremnika i to povećanjem spremljene količine osjetne topline akumulatora topline.

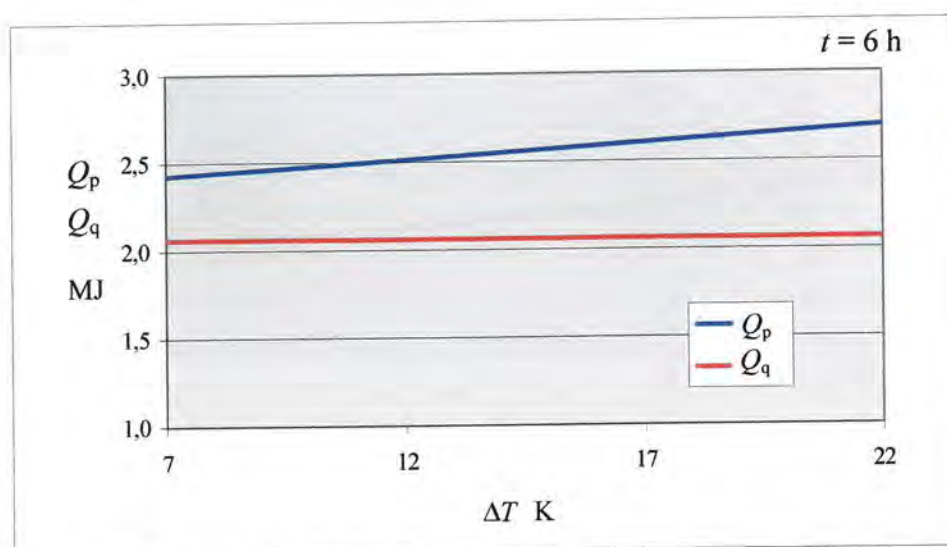


Slika 81. Utjecaj temperaturne razlike na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline

Iz slike 81 vidljivo je da se eksergijska iskoristivost spremnika pri procesu taljenja smanjuje povećanjem temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline. Povećanjem spomenute temperaturne razlike dolazi do povećanja eksergije fluida na ulazu u spremnik i eksergije fluida na izlazu iz spremnika kao i njihove razlike tj. predane eksergije fluida. Također, povećanjem temperaturne razlike između ulazne temperature fluida i temperature taljenja akumulatora topline povećavaju se i eksergije akumulirane u akumulatoru topline i fluidu koji se nalazi unutar spremnika. Međutim, predana eksergija od strane fluida s povećanjem temperaturne razlike raste brže od porasta akumuliranih eksergija unutar akumulatora topline i fluida što dovodi do smanjenja eksergijske iskoristivosti spremnika s porastom ulazne temperature fluida pri procesu spremanja topline.

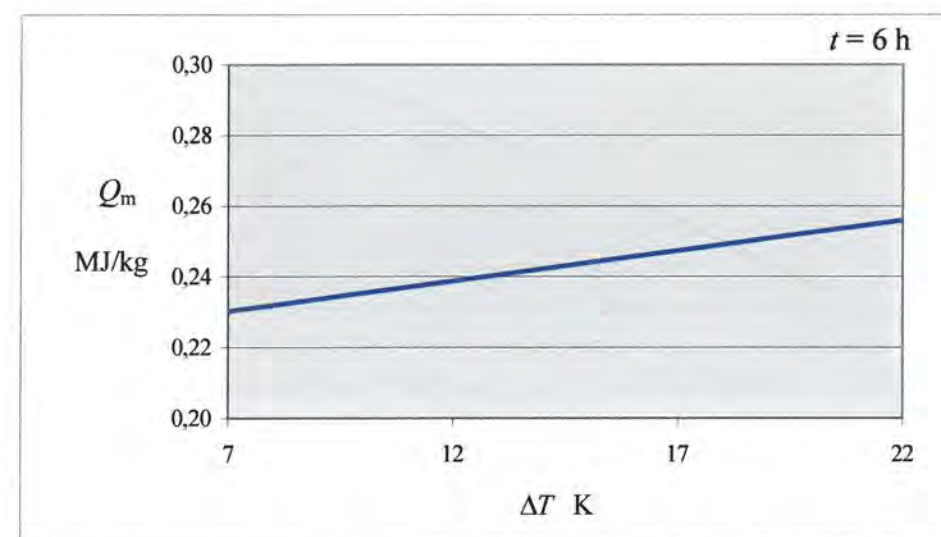
### 7.2.2 Skrućivanje akumulatora topline

Za proces korištenja spremljene topline analiziran je utjecaj temperaturne razlike između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida na ukupnu predanu toplinu od strane akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenu skrućivanja, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , predanu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Kao akumulator topline korišten je parafin RT 30, početno u kapljevitom agregatnom stanju prosječne temperature 313 K. Fluid je bila voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s. Bezdimenzijska duljina spremnika je  $L/D_i = 40$ , a bezdimenzijski radijus vanjske cijevi  $r_0/D_i = 1,8$ . Ukupno vrijeme skrućivanja iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćena područja temperaturnih razlika od 7 do 22 K. Dobiveni su rezultati prikazani u sljedećim dijagramima.



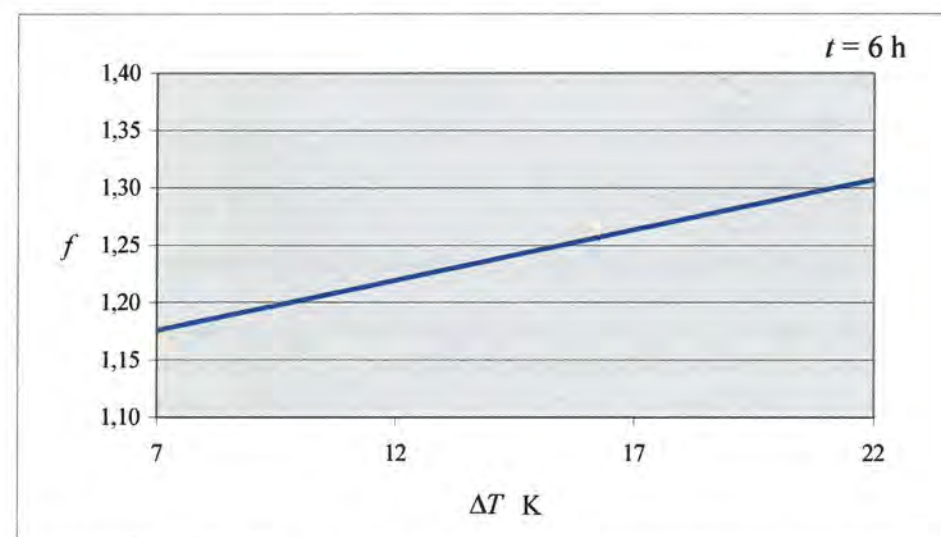
Slika 82. Utjecaj temperaturne razlike na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 82 vidljivo je da se, kao i u slučaju procesa taljenja, povećanjem temperaturne razlike između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida povećava ukupna količina predane topline od strane akumulatora topline, dok je njegova latentna toplina konstantna. Iz navedenog slijedi da se pri većim temperaturnim razlikama od strane akumulatora topline predaje veća količina njegove osjetne topline.



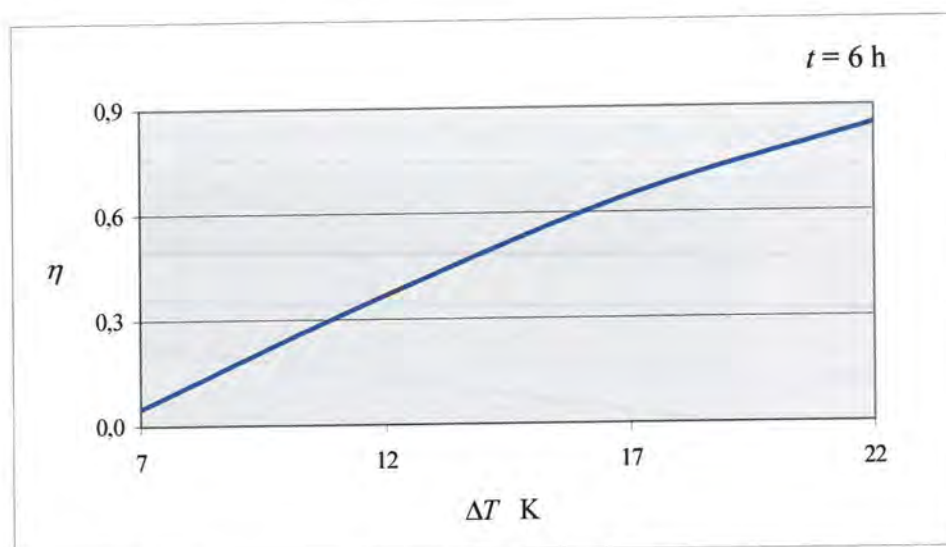
Slika 83. Utjecaj temperaturne razlike na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Budući da se povećanjem temperaturne razlike povećava ukupna predana toplina od strane akumulatora topline i specifična je toplina veća pri većim temperaturnim razlikama između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida pri procesu korištenja topline iz spremnika, što je vidljivo iz slike 83.



Slika 84. Utjecaj temperaturne razlike na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 84 vidljivo je da je pri većim temperaturnim razlikama  $f$  veće budući da akumulator topline predaje veću količinu osjetne topline.



Slika 85. Utjecaj temperaturne razlike na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline

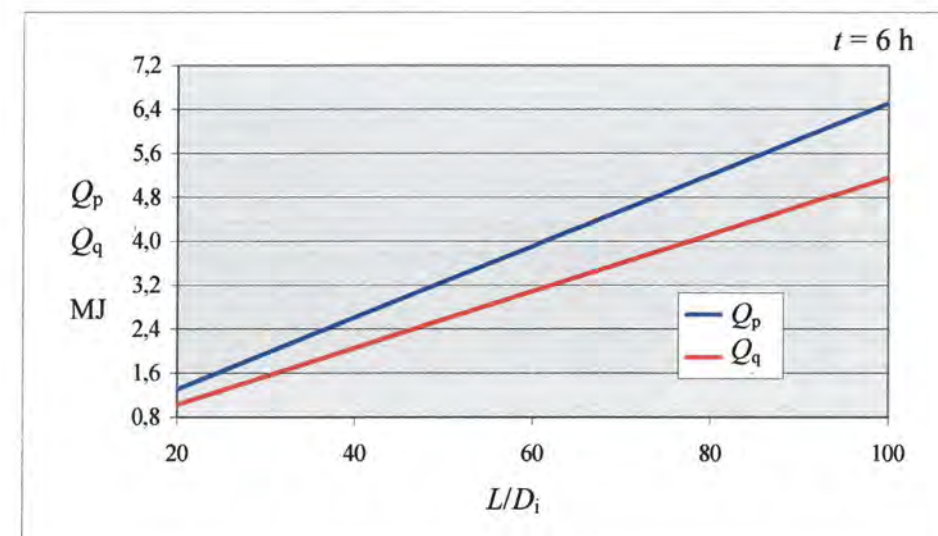
Iz slike 85 vidljivo je da povećanjem temperaturne razlike između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida dolazi do povećanja eksergijske iskoristivosti spremnika. Povećanjem spomenute temperaturne razlike povećavaju se eksergije fluida na izlazu iz spremnika i fluida na ulazu u spremnik. Isto tako povećava se i predana eksergija s akumulatora topline na fluid tj. razlika eksergija fluida na izlazu i ulazu u spremnik što uzrokuje povećanje eksergijske iskoristivosti spremnika s porastom temperaturne razlike između temperature skrućivanja akumulatora topline i ulazne temperature fluida.

### 7.3 Utjecaj duljine cijevi spremnika na izmjenu topline u latentnom spremniku

#### 7.3.1 Taljenje akumulatora topline

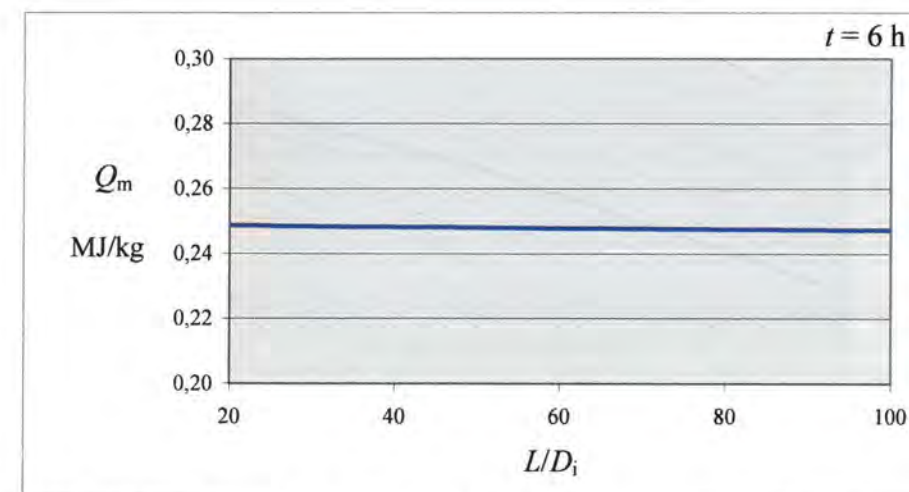
U nastavku istraživanja numeričkom je analizom analiziran utjecaj konstrukcijskih parametara na toplinsko ponašanje latentnog spremnika. U ovom je poglavlju analiziran utjecaj duljine cijevi spremnika na izmjenu topline pri procesu spremanja topline. Analiziran je utjecaj duljine cijevi na ukupnu spremljenu toplinu unutar akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , spremljenu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je voda konstantnog masenog protoka  $0,026 \text{ kg/s}$  s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom  $0,03 \text{ m/s}$  te ulazne temperature  $323 \text{ K}$ . Kao akumulator topline korišten je parafin RT 30, početno u krutom agregatnom stanju, početne temperature  $293$

K. Bezdimenzijski radijus vanjske cijevi iznosi  $r_o/D_i = 1,8$ . Ukupno vrijeme taljenja iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćene promjene bezdimenzijskih duljina cijevi od 20 do 100. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim dijagramima.



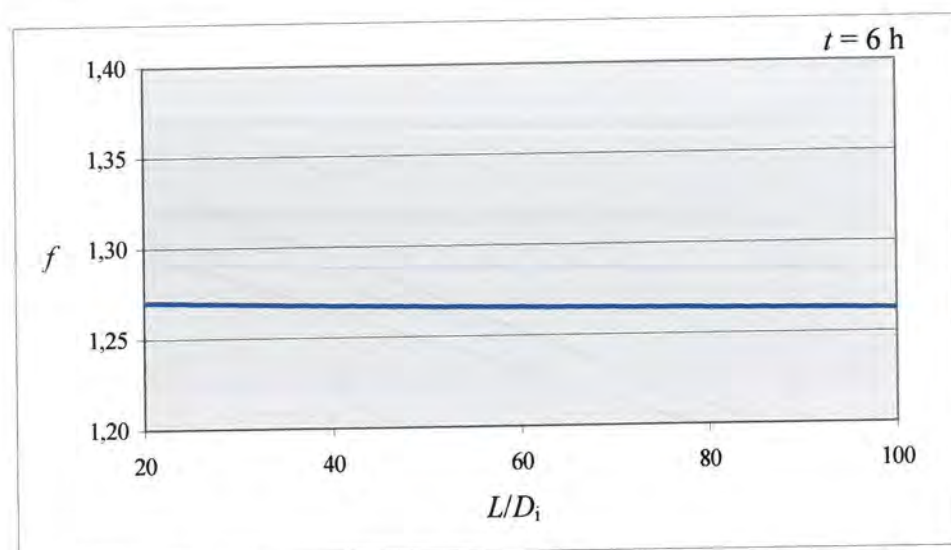
Slika 86. Utjecaj duljine cijevi na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz slike 86 vidljivo je da povećanje duljine cijevi znatno utječe na povećanje ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline u latentnom spremniku. Povećanjem duljine cijevi masa akumulatora topline unutar spremnika je veća pa je i količina spremljene topline veća. Stoga je u ovom slučaju korisnije promatrati promjenu specifične spremljene topline s povećanjem duljine cijevi što je prikazano na sljedećem dijagramu.



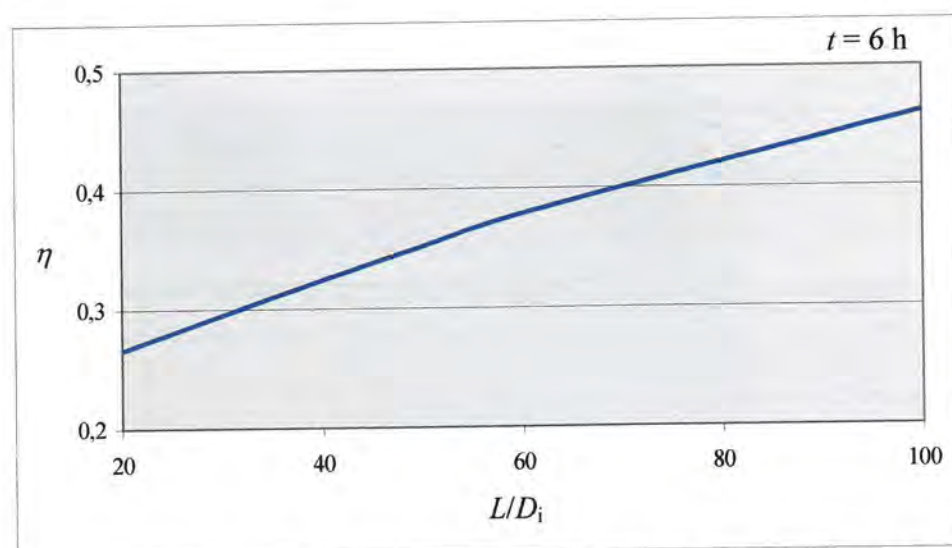
Slika 87. Utjecaj duljine cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz slike 87 uočava se da se povećanjem duljine cijevi specifična spremljena topline neznatno smanjuje tj. povećanje ukupne spremljene topline uzrokovano je samo povećanjem mase akumulatora topline.



Slika 88. Utjecaj duljine cijevi na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz prethodnog je dijagrama vidljivo da se omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja s povećanjem duljine cijevi neznatno smanjuje. Budući da latentna topline akumulatora topline raste proporcionalno s povećanjem mase moguće je zaključiti da povećanje duljine cijevi utječe na smanjenje specifične spremljene topline akumulatora topline.

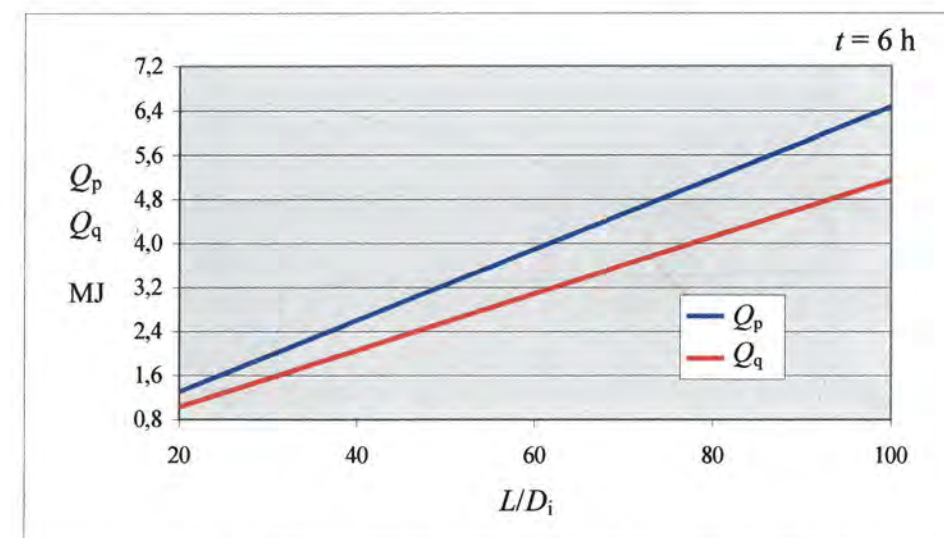


Slika 89. Utjecaj duljine cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline

Iz dijagrama na slici 89 vidljivo je da povećanjem duljine cijevi latentnog spremnika dolazi do povećanja njegove eksergijske iskoristivosti pri procesu taljenja. Povećanjem duljine cijevi spremnika povećava se njegov volumen, a time i masa akumulatora topline i fluida unutar spremnika. Zbog toga se povećavaju i eksergije akumulirane u akumulatoru topline i fluidu unutar spremnika što uzrokuje povećanje eksergijske iskoristivosti spremnika s povećanjem duljine cijevi.

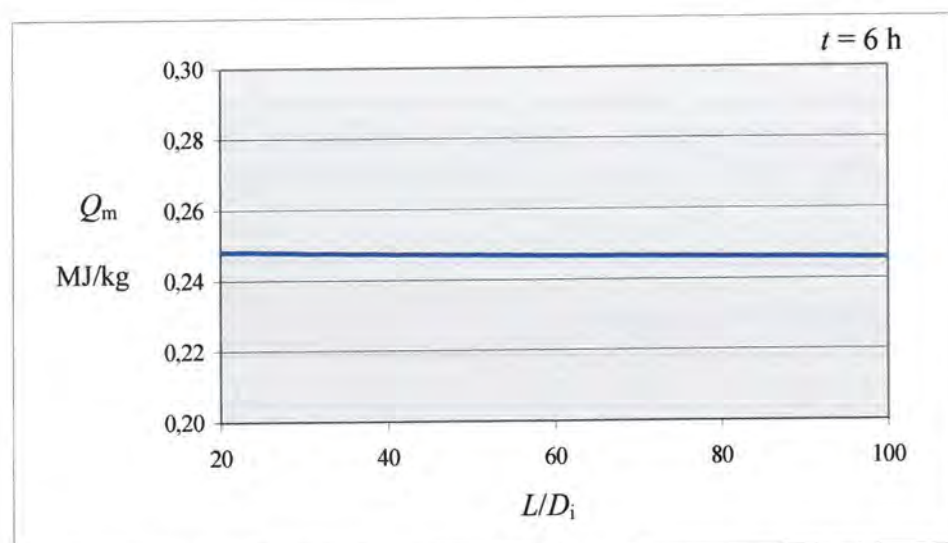
### 7.3.2 Skrućivanje akumulatora topline

U ovom je poglavlju analiziran utjecaj duljine cijevi spremnika na ukupnu predanu toplinu od strane akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , predanu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika pri procesu korištenja spremljene topline. Fluid je voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s, te ulaznom temperaturom 283 K. Akumulator topline je parafin RT 30 koji je početno u kapljevitom agregatnom stanju s prosječnom temperaturom 313 K. Bezdimenzijski je radijus vanjske cijevi  $r_o/D_i = 1,8$ . Ukupno vrijeme skrućivanja iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćene promjene bezdimenzijskih duljina cijevi od 20 do 100. Dobiveni su rezultati prikazani u sljedećim dijagramima.



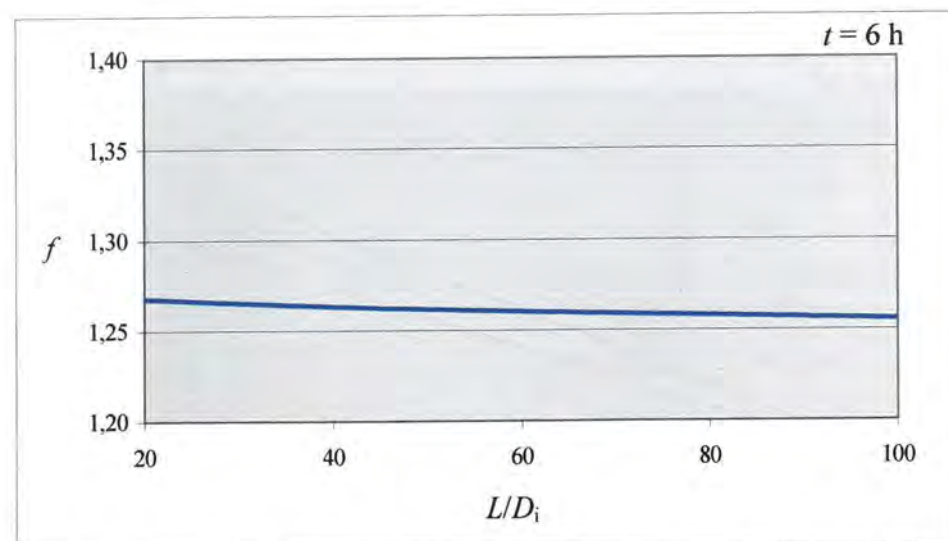
Slika 90. Utjecaj duljine cijevi na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Ukupna predana topline, kao i latentna topline akumulatora topline, raste s povećanjem duljine cijevi jer je ukupna masa akumulatora topline unutar spremnika veća.



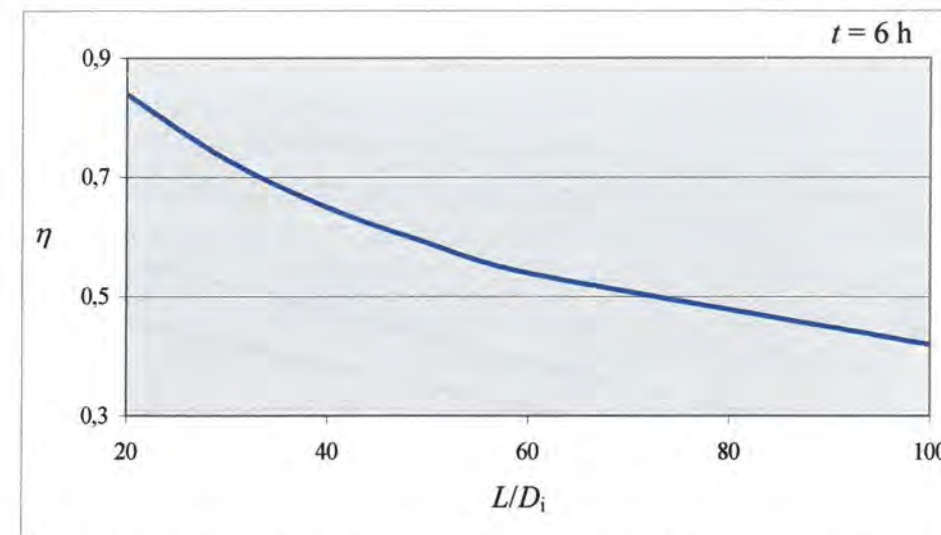
Slika 91. Utjecaj duljine cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 91 vidljivo je da porast ukupne predane topline ne znači porast specifične predane topline odnosno predane topline po jedinici mase akumulatora topline. Specifična predana toplina neznatno se smanjuje s povećanjem duljine cijevi.



Slika 92. Utjecaj duljine cijevi na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline smanjuje se s porastom duljine cijevi pa slijedi da se s porastom duljine cijevi smanjuje i specifična predana toplina budući da latentna toplina raste proporcionalno s povećanjem mase akumulatora topline.



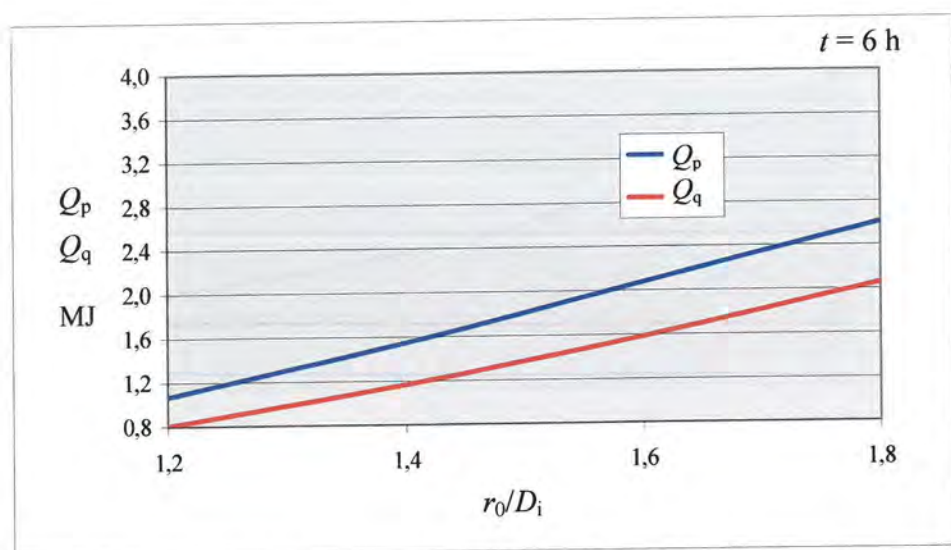
Slika 93. Utjecaj duljine cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline

Eksergijska iskoristivost latentnog spremnika pri procesu korištenja spremljene topline smanjuje se s porastom duljine cijevi. Porastom duljine cijevi spremnika povećava se masa akumulatora topline u spremniku, a time i početno spremljena eksergija unutar akumulatora topline. Razlika eksergija fluida na izlazu i ulazu u spremnik, tj. predana eksergija fluidu, također se povećava s porastom duljine cijevi, međutim to je povećanje sporije od povećanja eksergije spremljene unutar akumulatora topline. Ovo uzrokuje smanjenje eksergijske iskoristivosti spremnika za vrijeme procesa skrućivanja povećanjem duljine cijevi spremnika.

## 7.4 Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na izmjenu topline u latentnom spremniku

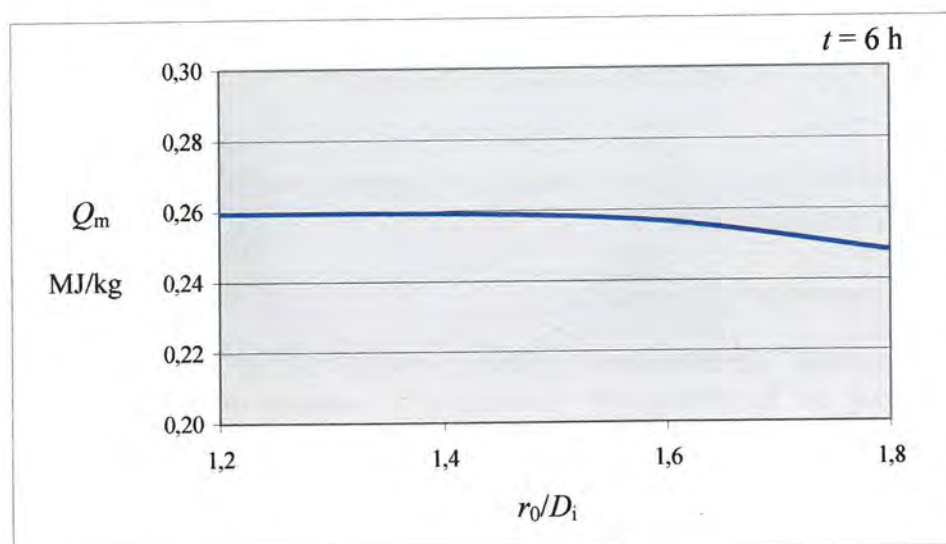
### 7.4.1 Taljenje akumulatora topline

U nastavku istraživanja numeričkom je analizom ispitivan utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi, kao jednog od konstrukcijskih parametara, na izmjenu topline pri procesu taljenja akumulatora topline. Analiziran je utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi, odnosno debljine sloja akumulatora topline oko cijevi kroz koju struji fluid, na ukupnu spremljenu toplinu unutar akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , spremljenu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je u razmatranim slučajevima voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s te ulazne temperature 323 K. Akumulator topline je parafin RT 30 početne temperature 293 K i početno u krutom agregatnom stanju. Bezdimenzijska je duljina cijevi spremnika  $L/D_i = 40$ . Ukupno vrijeme taljenja iznosilo je 6 h. Analizom su obuhvaćene promjene bezdimenzijskih radijusa vanjske cijevi od 1,2 do 1,8. Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim dijagramima.



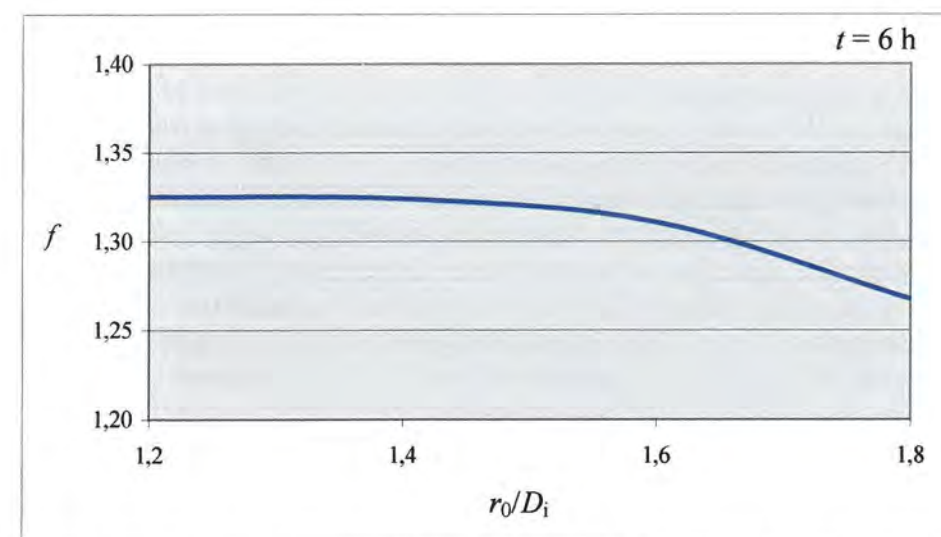
Slika 94. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz slike 94 vidljivo je da povećanje unutarnjeg radijusa vanjske cijevi, odnosno volumena cijevi kojega ispunjava akumulator topline, uzrokuje povećanje ukupne količine spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja.



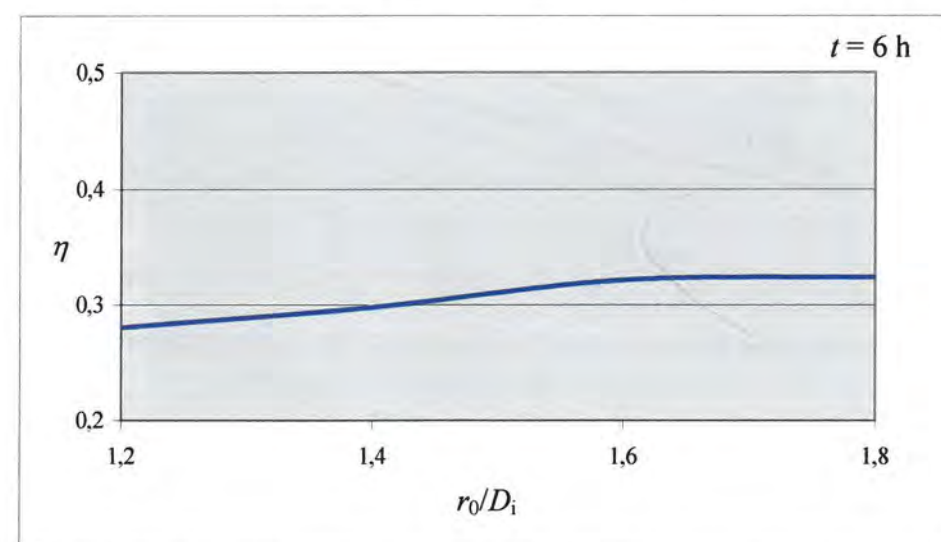
Slika 95. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja

Iz prethodnog je dijagrama vidljivo da povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi dolazi do smanjenja spremljene topline po jedinici mase akumulatora topline. Usporedbom promjene ove specifične topline s promjenom specifične topline akumulatora topline povećanjem duljine cijevi, vidljivo je da u ovom slučaju dolazi do znatnijeg smanjenja specifične spremljene topline.



Slika 96. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja

Povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi smanjenjuje se omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline, pa  $f$  za slučaj bezdimenzijskog radijusa 1,2 i prethodno navedene pogonske uvjete iznosi 1,33, a za slučaj bezdimenzijskog radijusa 1,8 on iznosi 1,27.



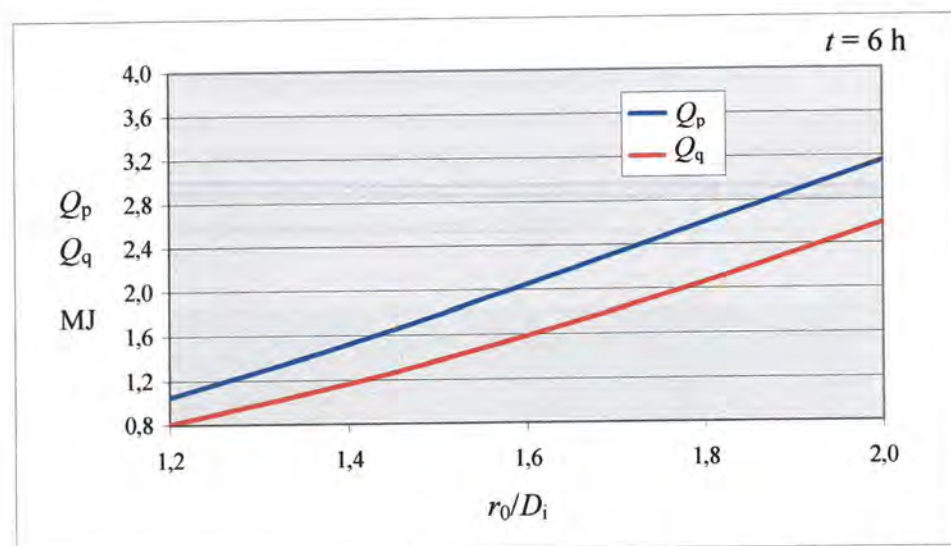
Slika 97. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline

Iz slike 97 vidljivo je da s povećanjem vanjskog radijusa cijevi dolazi do malog povećanja eksergijske iskoristivosti pri procesu taljenja. Povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi povećava se masa akumulatora topline unutar spremnika, pa to uzrokuje i povećanje eksergije akumulirane unutar akumulatora topline što dovodi i do povećanja eksergijske iskoristivosti spremnika.

### 7.4.2 Skrućivanje akumulatora topline

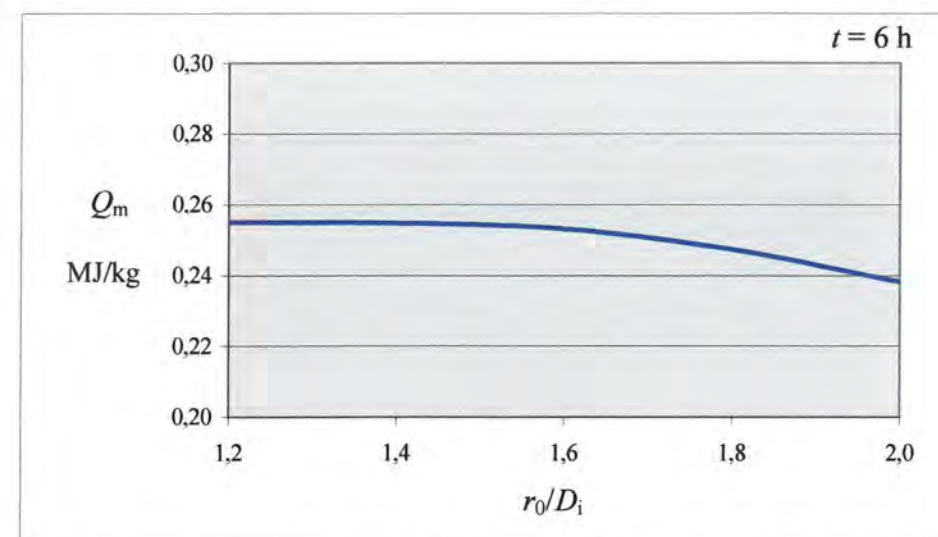
Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na izmjenu topline analiziran je i za proces korištenja topline iz spremnika. Pri tome je analiziran utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi, odnosno volumena cijevi kojega ispunjava akumulator topline, na ukupnu predanu toplinu od strane akumulatora topline  $Q_p$  u zadanom vremenskom intervalu, latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , predanu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te na eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je voda konstantnog masenog protoka  $0,026 \text{ kg/s}$  s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom  $0,03 \text{ m/s}$  te ulazne temperature  $283 \text{ K}$ . Kao akumulator topline korišten je parafin RT 30. Akumulator topline je početno u kapljevitom agregatnom stanju i ima početnu temperaturu  $313 \text{ K}$ . Bezdimenzijska duljina cijevi iznosi  $L/D_i = 40$ . Ukupno vrijeme skrućivanja iznosilo je  $6 \text{ h}$ .

Analizom su obuhvaćene promjene bezdimenzijskih radijusa cijevi od  $1,2$  do  $2$ . Dobiveni rezultati prikazani su u sljedećim dijagramima.



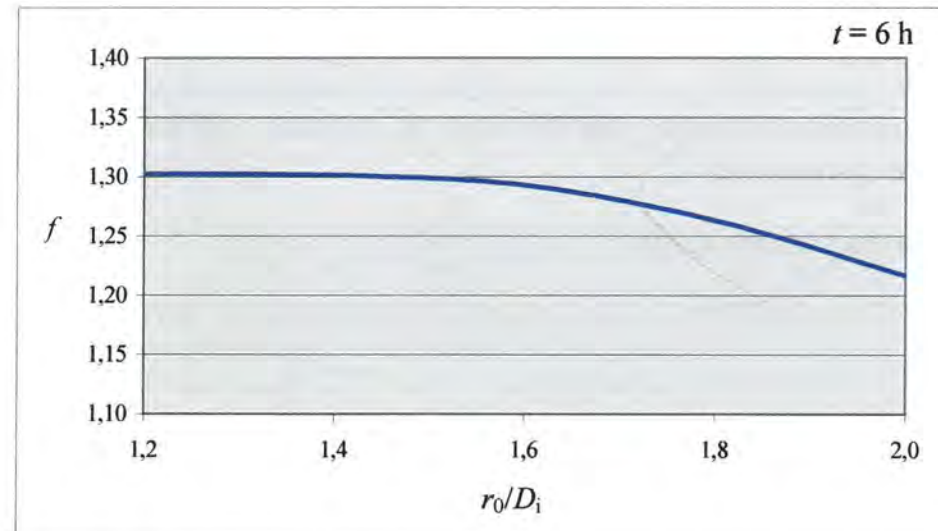
Slika 98. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 98 vidljivo je da s povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi raste i količina ukupne predane topline od strane akumulatora topline, kao i latentna toplina akumulatora topline. Porast latentne topline uzrokovan je povećanjem volumena cijevi kojega ispunjava akumulator topline odnosno povećanjem njegove mase. Prema tome, budući da se povećanjem radijusa vanjske cijevi povećava masa akumulatora topline, pogodnije je promatrati promjenu predane topline po jedinici mase akumulatora topline što je prikazano u sljedećem dijagramu.



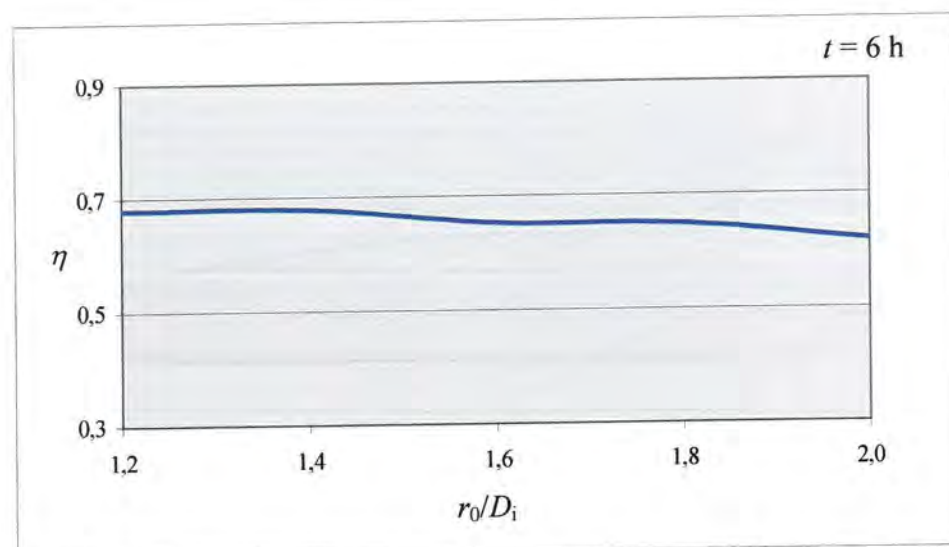
Slika 99. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja

Iz slike 99 vidljivo je da povećanje unutarnjeg radijusa vanjske cijevi uzrokuje smanjenje specifične predane topline, odnosno predane topline po jedinici mase akumulatora topline. Prema tome, što je omjer vanjskog radijusa i promjera unutarnje cijevi veći, akumulator topline može predati manju specifičnu toplinu pri procesu skrućivanja.



Slika 100. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja

S povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi smanjuje se i omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja što je vidljivo iz slike 100.



Slika 101. Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline

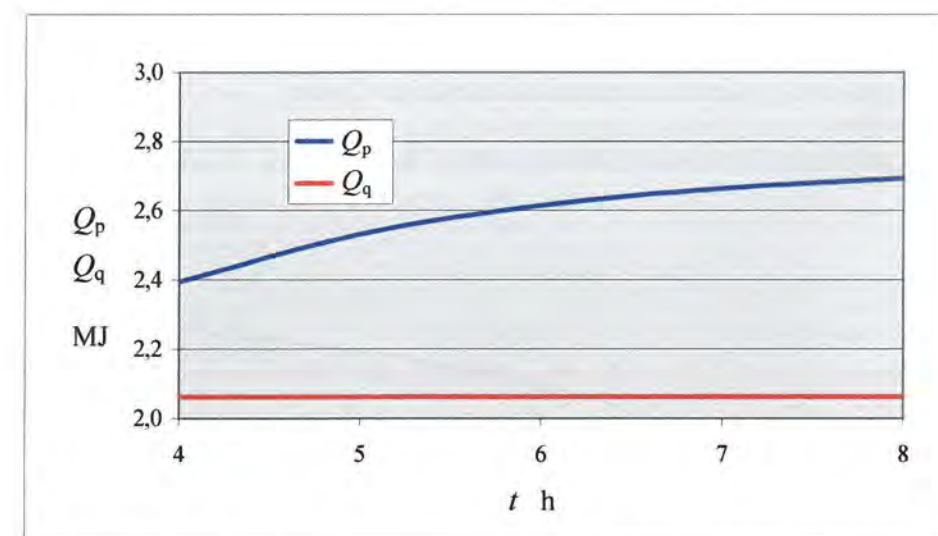
Iz slike 101 vidljivo je da se povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi neznatno smanjuje i eksergijska iskoristivost latentnog spremnika pri procesu korištenja topline. Povećanjem unutarnjeg radijusa vanjske cijevi povećava se volumen kojega ispunjava akumulator topline te se povećava i njegova eksergija. Povećanje eksergije akumulirane unutar akumulatora topline uzrokuje smanjenje eksergijske iskoristivosti spremnika pri procesu skrućivanja akumulatora topline.

## 7.5 Utjecaj vremena taljenja i skrućivanja na izmjenu topline u latentnom spremniku

### 7.5.1 Taljenje akumulatora topline

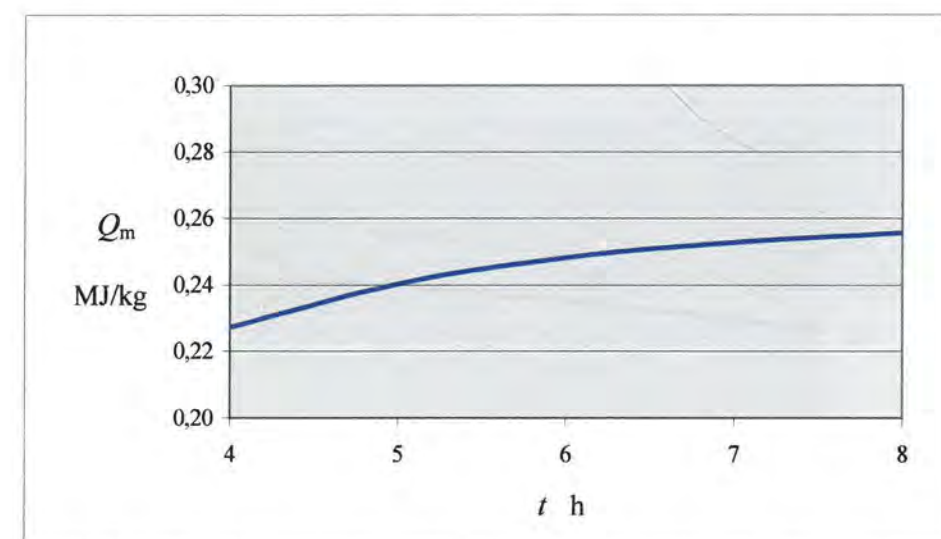
U ovom je poglavlju analiziran utjecaj raspoloživog vremena za spremanje topline unutar spremnika tj. utjecaj vremena taljenja na izmjenu topline u latentnom spremniku. Pri tome je analiziran utjecaj vremena taljenja na količinu ukupne spremljene topline unutar akumulatora topline  $Q_p$ , latentnu toplinu akumulatora topline  $Q_q$ , spremljenu toplinu po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Kao fluid u analizi je korištena voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s te ulazne temperature 323 K. Kao akumulator topline korišten je parafin RT 30, početno u krutom agregatnom stanju prosječne temperature 293 K. Bezdimenzijska je duljina cijevi  $L/D_i = 40$ , a

bezdimenzijski radijus vanjske cijevi  $r_0/D_i = 1,8$ . Analizom su obuhvaćene promjene vremena taljenja od 4 do 8 h. Dobiveni su rezultati prikazani su na sljedećim slikama.



Slika 102. Utjecaj vremena taljenja na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline

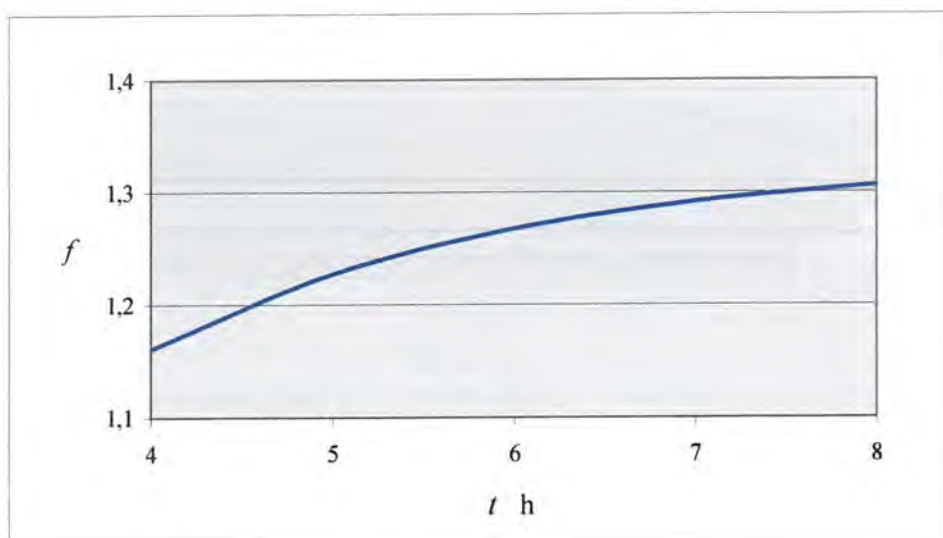
Iz slike 102 vidljivo je da se povećanjem vremena spremanja topline povećava i ukupna količina spremljene toplina. Ovo je povećanje međutim ograničeno, odnosno spremljena se toplina asimptotski približava vrijednosti topline koju bi bilo moguće spremiti unutar akumulatora topline kada bi se on mogao zagrijati do ulazne temperature fluida u spremnik. Povećanje ukupne spremljene topline uzrokovano je povećanjem spremljene osjetne topline akumulatora topline, dok latentna toplina akumulatora topline ne ovisi o vremenu taljenja u slučajevima kada je u zadanom vremenu taljenja rastaljena ukupna količina akumulatora topline unutar spremnika.



Slika 103. Utjecaj vremena taljenja na specifičnu toplinu akumulatora topline

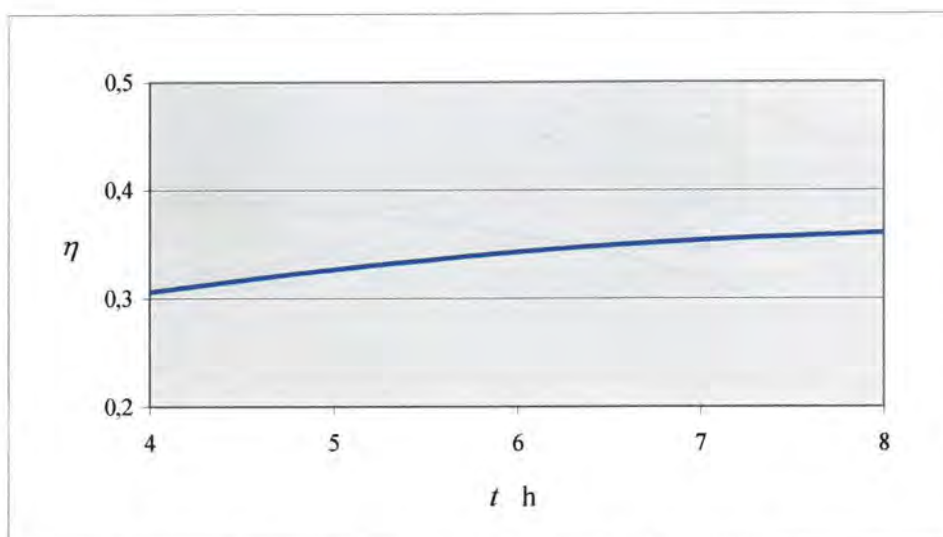


Iz prethodne je slike vidljivo da povećanje vremena taljenja uzrokuje i povećanje specifične spremljene topline unutar akumulatora topline. Masa akumulatora topline unutar spremnika je konstantna te se proporcionalno povećanju ukupne spremljene topline povećava i spremljena toplina po jedinici mase tj. specifična toplina akumulatora topline.



Slika 104. Utjecaj vremena taljenja na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline

Povećanjem vremena taljenja povećava se omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline budući da se povećanjem vremena taljenja povećava količina spremljene osjetne topline akumulatora topline. Iz dijagrama je vidljivo da je pri zadanim uvjetima akumulator topline već nakon 4 h potpuno rastaljen budući da je  $f > 1$ .

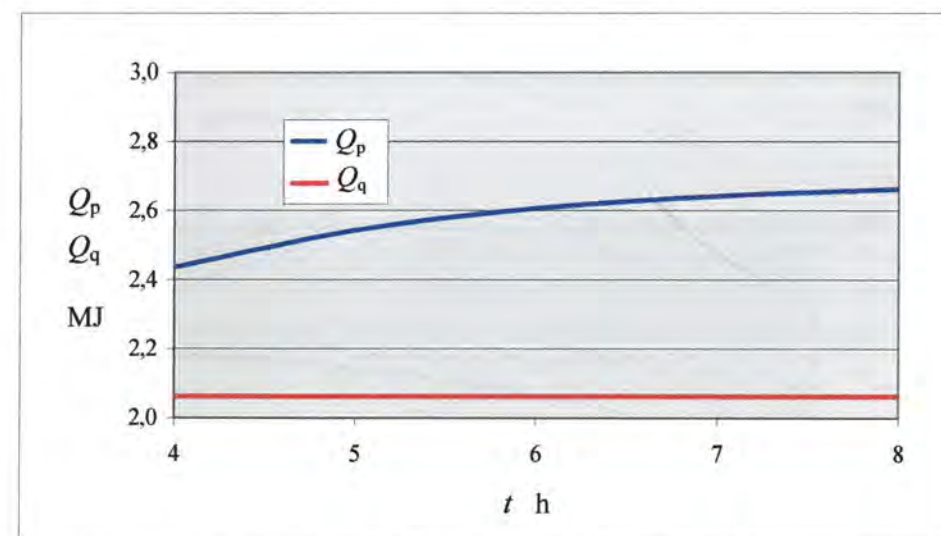


Slika 105. Utjecaj vremena taljenja akumulatora topline na eksergijsku iskoristivost spremnika

Iz slike 105 vidljivo je da se povećanjem vremena taljenja povećava eksergijska iskoristivost latentnog spremnika topline. Povećanjem raspoloživog vremena taljenja povećava se eksergija akumulirana u akumulatoru topline i fluidu unutar spremnika. Također, povećanjem vremena taljenja povećavaju se i eksergije fluida na ulazu i izlazu iz spremnika, kao i predana eksergija od strane fluida koji struji kroz unutarnju cijev spremnika. Međutim, povećanje akumulirane eksergije unutar akumulatora topline veće je od povećanja predane eksergije od strane fluida što uzrokuje povećanje eksergijske iskoristivosti s povećanjem vremena taljenja.

### 7.5.2 Skrućivanje akumulatora topline

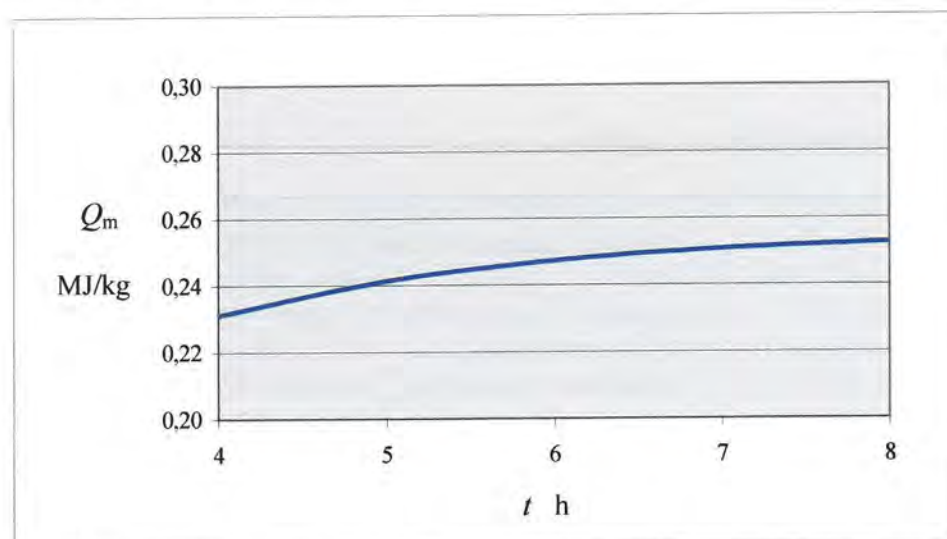
U nastavku je analiziran i utjecaj raspoloživog vremena za korištenje spremljene topline tj. utjecaj vremena skrućivanja na količinu ukupne predane topline od strane akumulatora topline  $Q_p$ , količinu latentne topline akumulatora topline  $Q_q$ , količinu predane topline po jedinici mase akumulatora topline  $Q_m$ , omjer između ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline  $f$  te eksergijsku iskoristivost spremnika. Fluid je u izvršenoj analizi voda konstantnog masenog protoka 0,026 kg/s s pripadnom prosječnom ulaznom brzinom 0,03 m/s i ulaznom temperaturom 283 K. Akumulator topline je parafin RT 30, početno u kapljevitom agregatnom stanju prosječne temperature 313 K. Bezdimenzijska duljina cijevi je  $L/D_i = 40$ , a bezdimenzijski radijus vanjske cijevi  $r_o/D_i = 1,8$ . Analizom su obuhvaćene promjene vremena skrućivanja od 4 do 8 h. Dobiveni su rezultati analize prikazani su na sljedećim dijagramima.



Slika 106. Utjecaj vremena skrućivanja na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline

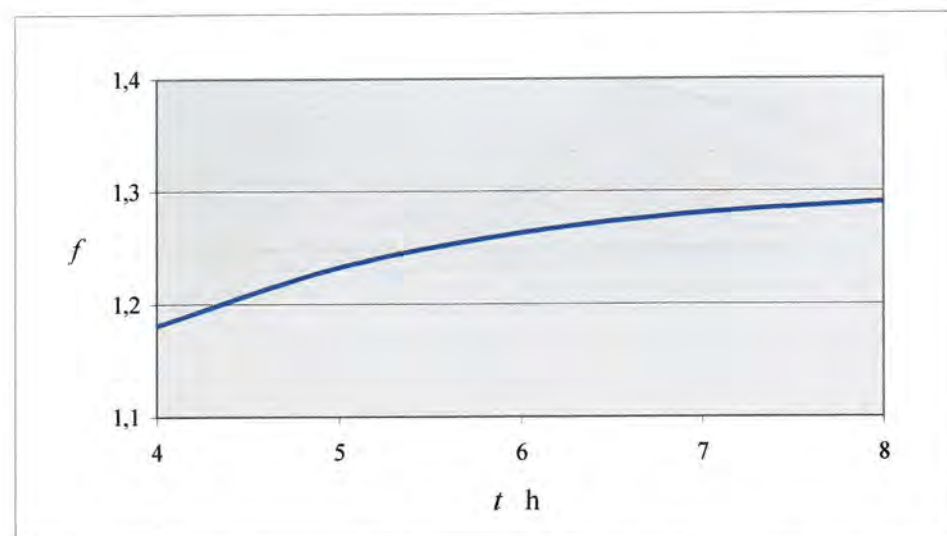
Povećanjem vremena skrućivanja povećava se količina ukupne predane topline od strane akumulatora topline što je vidljivo iz prethodnog dijagrama. Količina predane topline s povećanjem vremena skrućivanja asimptotski se približava vrijednosti topline koju bi se moglo dobiti iz spremnika kada bi se akumulator topline mogao ohladiti do vrijednosti ulazne

temperature fluida u spremnik. Slično kao i u slučaju procesa taljenja, povećanje ukupne predane topline uzrokovano je povećanjem predane osjetne topline akumulatora topline. U slučajevima kada je u zadanom vremenu korištenja topline postignuto skrućivanje ukupne količine akumulatora topline unutar spremnika predana je latentna topline akumulatora topline neovisna o vremenu korištenja topline tj. vremenu skrućivanja.



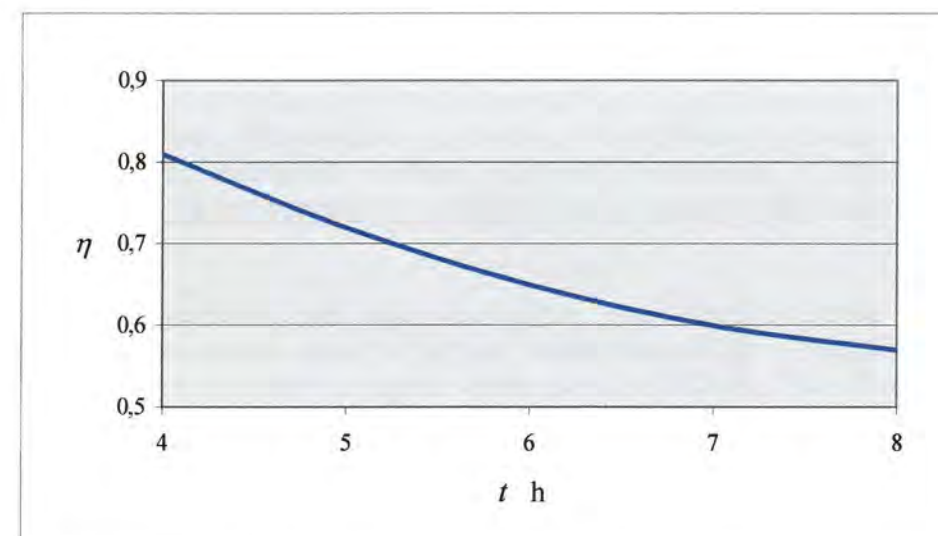
Slika 107. Utjecaj vremena skrućivanja na specifičnu toplinu akumulatora topline

Iz slike 107 vidljivo je da se povećanjem vremena skrućivanja povećava i specifična predana topline od strane akumulatora topline. Povećanje specifične predane topline za vrijeme skrućivanja akumulatora topline proporcionalno je povećanju ukupne predane topline akumulatora topline.



Slika 108. Utjecaj vremena skrućivanja na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline

Povećanjem vremena skrućivanja povećava se i omjer ukupne količine predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu korištenja topline iz spremnika. Iz dijagrama je vidljivo da je za zadane pogonske uvjete i konstrukcijske parametre spremnika akumulator topline nakon 4 h potpuno u krutom agregatnom stanju budući da je  $f > 1$ .



Slika 109. Utjecaj vremena skrućivanja akumulatora topline na eksergijsku iskoristivost spremnika

Povećanje vremena skrućivanja uzrokuje smanjenje eksergijske iskoristivosti pri procesu korištenja topline iz spremnika latentne topline što je vidljivo iz slike 109. Povećanjem vremena skrućivanja smanjuje se predana eksergija od strane akumulatora topline što dovodi do smanjenja eksergijske iskoristivosti spremnika.

Izbor veličina analiziranih pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara latentnog spremnika topline ovisi o zadanoj funkciji spremnika u konkretnom slučaju tj. ovisi o zahtijevanoj spremljenoj toplini unutar spremnika te o vremenu u kojem ona mora biti spremljena odnosno iskorištena. Provedena analiza daje smjernice za dimenzioniranje latentnog spremnika topline s obzirom na zadatke i definirane uvjete koji se pred njega postavljaju.

## 8 Zaključak

U ovom je radu izvršena termodinamička analiza akumulacije topline u latentnom spremniku. Definiran je matematički model fizikalnih pojava nestacionarne izmjene topline pri procesu spremanja i procesu korištenja topline iz spremnika. Prijelaz topline putem prisilne konvekcije između fluida i stijenke cijevi, provođenje topline kroz stijenkicu cijevi te izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline opisani su diferencijalnim jednadžbama strujanja i prijelaza topline. Izmjena topline pri promjeni agregatnog stanja akumulatora topline opisana je entalpijskom jednadžbom. Matematički je model, uz definirane početne i rubne uvjete, diskretiziran primjenom numeričke metode kontrolnih volumena, a dobiveni su sustavi algebarskih jednadžbi riješeni iteracijski kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u.

Eksperimentalnim je dijelom istraživanja obuhvaćeno projektiranje i izrada eksperimentalne naprave, tj. modela spremnika latentne topline, njeno povezivanje s pripadajućom mjernom opremom, te mjerenja vremenskih promjena temperatura pri taljenju i skrućivanju akumulatora topline vršena termoparovima spojenima na sustav za akviziciju podataka. Mjerenja su vršena za slučaj spremanja i slučaj korištenja topline pri različitim pogonskim uvjetima. Cilj je provedenog eksperimentalnog istraživanja bio provjera valjanosti definiranog numeričkog modela. Usporedbom vremenskih promjena temperatura dobivenih numeričkim proračunom i eksperimentalnim putem utvrđeno je dobro međusobno slaganje. Eksperimentom je uočeno da se spremanje topline za odabrani primjer akumulatora topline odvija unutar određenog temperaturnog intervala, a ne pri konstantnoj temperaturi. Za što točnije matematičko opisivanje fizikalnih pojava unutar spremnika, razvijen je računalni program kojim se taljenje akumulatora topline tretira unutar zadanog temperaturnog intervala.

Numeričkim proračunom diferencijalnih jednadžbi strujanja pri prisilnoj konvekciji između fluida i stijenke cijevi dobiveno je polje strujanja za nestišljivi laminarni tok. Proračunom je uočeno da polje brzina vrlo brzo postiže stacionarno stanje, te nakon kratkog vremena profili brzina duž cijevi ostaju nepromijenjeni i dobiva se potpuno razvijeno polje brzina. Također, numeričkim je proračunom dobiven tok lokalne Nusseltove značajke kojom je opisan konvektivni prijelaz topline. Nusseltova značajka opada pri strujanju fluida duž cijevi, pa je i prijelaz topline konvekcijom intenzivniji na ulazu fluida u spremnik. Temperatura fluida uz stijenkicu cijevi mijenja se kako granica taljenja odnosno skrućivanja napreduje, pa temperaturno polje fluida nikada ne postiže potpuno razvijeno stanje. Utvrđeno je da se korištenjem empirijskih izraza za potpuno razvijeno toplinsko stanje pri proračunu prijelaza topline konvekcijom s fluida na stijenkicu cijevi uvodi značajna greška. Stoga je zaključeno da se konvektivni prijelaz topline pri laminarnom prisilnom strujanju mora računati istovremeno s problemom izmjene topline pri promjeni faze akumulatora topline pri čemu je potrebno riješiti polje strujanja i temperaturno polje fluida.

Numeričkim su proračunom nestacionarne izmjene topline unutar spremnika dobivena temperaturna polja te granice područja taljenja odnosno skrućivanja u različitim vremenskim intervalima čime je simulirano toplinsko ponašanje spremnika pri spremanju odnosno korištenju topline. Za analizirani je tip latentnog spremnika te primjer fluida i akumulatora topline uočeno da do taljenja, odnosno skrućivanja, najprije dolazi na vanjskoj površini unutarnje cijevi, a zatim se granica taljenja, odnosno skrućivanja, širi prema unutarnjem radijusu vanjske cijevi. Na

osnovu proračunatih vremenskih promjena temperatura izračunata je količina topline koju je u određenom vremenskom intervalu moguće pohraniti unutar spremnika, te količina topline koju je iz spremnika moguće iskoristiti. Nizom numeričkih proračuna analiziran je utjecaj pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara spremnika na količinu spremljene odnosno iskorištene topline te eksergijske iskoristivosti spremnika. Rezultati ove analize predstavljaju smjernice za optimalno dimenzioniranje latentnog spremnika sa stajališta njegova kapaciteta i optimalnog rada.

Znanstveni je doprinos ovoga rada u razvijenom i eksperimentom potvrđenom pouzdanom numeričkom modelu kojim je moguće odrediti polje strujanja fluida, te nestacionarna temperaturna polja fluida, stijenke i akumulatora topline pri procesu spremanja i procesu korištenja topline iz latentnog spremnika. Mogućnost pouzdane simulacije predstavlja doprinos rješavanju problema akumulacije topline jer se korištenjem razvijenog numeričkog modela može predvidjeti dinamika promjena temperaturne raspodjele unutar spremnika. Što točnija nestacionarna temperaturna raspodjela unutar spremnika nužna je za određivanje količine akumulirane te iskorištene topline iz latentnog spremnika.

U nastavku se istraživanja u ovom području planira modifikacija provedene numeričke analize za primjenu na različite tipove latentnih spremnika topline kao što su spremnik u obliku pločastog izmjenjivača te spremnik u obliku cilindra ispunjenog kuglama u kojima se nalazi akumulator topline. Također, u nastavku se istraživanja planira i modifikacija numeričkog modela za primjenu na latentne spremnike koji se koriste u klimatizacijskoj tehnici, a zadatak im je spremanje rashladne energije.

Ovakav numerički model, koji za računalno rješavanje postavlja prilično visoke zahtjeve za brzinom i memorijskom prostorom, sa raspoloživim računalima nije mogao biti proširen na trodimenzijski model. Razvojem i uporabom računala s većim mogućnostima, bit će moguće provedenu analizu proširiti za još jednu prostornu dimenziju te uzeti u obzir utjecaj slobodne konvekcije u kapljevitoj fazi akumulatora topline, što se također planira nastavkom istraživanja.

## 9 Literatura

- [1] Voller, V., Cross, M.: *Accurate solutions of moving boundary problems using the enthalpy method*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981) 3, 545-556.
- [2] Voller, V. R., Cross, M., Markatos, N. C.: *An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 24 (1987), 271-284.
- [3] Voller, V. R.: *Fast Implicit Finite-Difference Method for the Analysis of Phase Change Problems*, Numerical Heat Transfer, 17 (1990), 155-169.
- [4] Hunter, L. W., Kuttler, J. R.: *The Enthalpy Method for Heat Conduction Problems With Moving Boundaries*, Journal of Heat Transfer, 111 (1989), 239-242.
- [5] Hsu, C. F., Sparrow, E. M., Patankar, S. V.: *Numerical solution of moving boundary problems by boundary immobilization and a control-volume-based finite-difference scheme*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981) 8, 1335-1343.
- [6] Cao, Y., Faghri, A., Chang, W. S.: *A numerical analysis of Stefan problems for generalized multi-dimensional phase-change structures using the enthalpy transforming model*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 32 (1989) 7, 1289-1298.
- [7] Lee, S. L., Tzong, R. Y.: *An Enthalpy Formulation for Phase Change Problems with a Large Thermal Diffusivity Jump Across the Interface*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34 (1991) 6, 1491-1502.
- [8] Chen, C. J., Chiou, J. S.: *Laminar and Turbulent Heat Transfer in the Pipe Entrance Region for Liquid Metals*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981) 7, 1179-1189.
- [9] Sparrow, E. M., Hsu, C. F.: *Analysis of two-dimensional freezing on the outside of a coolant-carrying tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981) 8, 1345-1357.
- [10] Cao, Y., Faghri, A.: *Performance characteristics of a thermal energy storage module: a transient PCM / forced convection conjugate analysis*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 34 (1991) 1, 93-101.
- [11] Cao, Y., Faghri, A.: *A Numerical Analysis of Phase-Change Problems Including Natural Convection*, Journal of Heat Transfer, 112 (1990), 812-816.
- [12] Cao, Y., Faghri, A.: *A Study of Thermal Energy Storage Systems With Conjugate Turbulent Forced Convection*, Journal of Heat Transfer, 114 (1992), 1019-1027.
- [13] Lacroix, M.: *Numerical Simulation of a Shell-and-tube Latent Heat Thermal Energy Storage Unit*, Solar Energy, 50 (1993) 4, 357-367.

- [14] Bellecci, C., Conti, M.: *Phase change thermal storage: transient behaviour analysis of a solar receiver / storage module using the enthalpy method*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36 (1993) 8, 2157-2163.
- [15] Bellecci, C., Conti, M.: *Latent heat thermal storage for solar dynamic power generation*, Solar Energy, 51 (1993) 3, 169-173.
- [16] Bellecci, C., Conti, M.: *Transient behaviour analysis of a latent heat thermal storage module*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36 (1993) 15, 3851-3857.
- [17] Zhang, Y., Faghri, A.: *Semi-analytical solution of thermal energy storage system with conjugate laminar forced convection*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (1996) 4, 717-724.
- [18] Hsieh, C. K.: *Exact Solutions of Stefan Problems for a Heat Front Moving at a Constant Velocity in a Quasi-steady state*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 38 (1995) 1, 71-79.
- [19] Živković, B., Fujii, I.: *An Analysis of Isothermal Phase Change of Phase Change Material Within Rectangular and Cylindrical Containers*, Solar Energy, 70 (2001) 1, 51-61.
- [20] Trp, A., Franković, B., Lenić, K.: *An Analysis of Phase Change Heat Transfer in a Solar Thermal Energy Store*, Proceedings of the ISES 1999 Solar World Congress, Vol. III, Jerusalem, Izrael, 1999, 484-489.
- [21] Henze, R. H., Humphrey, J. A. C.: *Enhanced Heat Conduction in Phase-Change Thermal Energy Storage Devices*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 24 (1981) 3, 459-474.
- [22] Lacroix, M.: *Study of the heat transfer behavior of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 36 (1993) 8, 2083-2092.
- [23] Zhang, Y., Faghri, A.: *Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the external radial finned tube*, Journal of Enhanced Heat Transfer, 3 (1996), 119-127.
- [24] Zhang, Y., Faghri, A.: *Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally radial finned tube*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (1996) 15, 3165-3173.
- [25] Velraj, R., Seeniraj, R. V., Hafner, B., Faber, C., Schwarzer, K.: *Experimental analysis and numerical modelling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit*, Solar Energy, 60 (1997) 5, 281-290.
- [26] Gong, Z. X., Mujumdar, A. S.: *Enhancement of energy charge-discharge rates in composite slabs of different phase change materials*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 39 (1996) 4, 725-733.

- [27] Vick, B., Nelson, D. J., Yu, X.: *Freezing and Melting With Multiple Phase Fronts Along the Outside of a Tube*, Journal of Heat Transfer, 120 (1998) 2, 422-429.
- [28] Laouadi, A., Lacroix, M.: *Thermal performance of a latent heat energy storage ventilated panel for electric load management*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42 (1999) 2, 275-286.
- [29] Ghoneim, A. A.: *Comparison of Theoretical Models of Phase-Change and Sensible Heat Storage for Air and Water-based Solar Heating Systems*, Solar Energy, 42 (1989) 3, 209-220.
- [30] Hoogendoorn, C. J., Bart, G. C. J.: *Performance and Modelling of Latent Heat Stores*, Solar Energy, 48 (1992) 1, 53-58.
- [31] Das, S., Dutta, T. K.: *Mathematical Modeling and Experimental Studies on Solar Energy Storage in a Phase Change Material*, Solar Energy, 51 (1993) 5, 305-312.
- [32] Hasan, A.: *Phase Change Material Energy Storage System Employing Palmitic Acid*, Solar Energy, 52 (1994) 2, 143-154.
- [33] Bajnoczy, G., Palfy, E. G.: *Heat Storage Properties of Calcium Chloride Hexahydrate – Tetrahydrate System*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference on Solar Energy at High Latitudes NORTH SUN '97, Espoo-Otaniemi, Finland, 1997, 592-597.
- [34] Rabin, Y., Bar-Niv, I., Korin, E., Mikic, B.: *Integrated Solar Collector Storage System Based on a Salt-Hydrate Phase-Change Material*, Solar Energy, 55 (1995) 6, 435-444.
- [35] Ip, K., Gates, J.: *Potential of Solar Thermal Storage Using Phase Change Materials in the UK*, Proceedings of the World Renewable Energy Congress VI (WREC 2000), Vol. 1, Brighton, UK, 2000, 673-676.
- [36] Esen, M., Aydin, D., Durmus, A.: *Geometric Design of Solar-Aided Latent Heat Store Depending on Various Parameters and Phase Change Materials*, Solar Energy, 62 (1998) 1, 19-28.
- [37] Manz, H., Egolf, P. W., Suter, P., Goetzberger, A.: *TIM – PCM External Wall System for Solar Space Heating and Daylighting*, Solar Energy, 61 (1997) 6, 369-379.
- [38] Rosen, M. A., Hooper, F. C., Barbaris, L. N.: *Exergy Analysis for the Evaluation of the Performance of Closed Thermal Energy Storage Systems*, Journal of Solar Energy Engineering, 110 (1988), 255-261.
- [39] De Lucia, M., Bejan, A.: *Thermodynamics of Energy Storage by Melting Due to Conduction or Natural Convection*, Journal of Solar Energy Engineering, 112 (1990), 110-116.
- [40] Gunnewiek, L. H., Nguyen, S., Rosen, M. A.: *Evaluation of the optimum discharge period for closed thermal energy storages using energy and exergy analyses*, Solar Energy, 51 (1993) 1, 39-43.

- [41] Krane, R. J.: *A Second Law analysis of the optimum design and operation of thermal energy storage systems*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 30 (1987) 1, 43-57.
- [42] Bellecci, C., Conti, M.: *Phase change energy storage: entropy production, irreversibility, and second law efficiency*, Solar Energy, 53 (1994) 2, 163-170.
- [43] Watanabe, T., Kanzawa, A.: *Second law optimization of a latent heat storage system with PCMs having different melting points*, Heat Recovery Systems, 15 (1995) 7, 641-653.
- [44] Conti, M., Bellecci, C., Charach, Ch.: *Thermodynamic Design of a Phase Change Thermal Storage Module*, Journal of Solar Energy Engineering, 118 (1996), 89-96.
- [45] Conti, M., Charach, Ch.: *Thermodynamics of Heat Storage in a PCM Shell-and-tube Heat Exchanger in Parallel or in Series with a Heat Engine*, Solar Energy, 57 (1996) 1, 59-68.
- [46] Versteeg, H. K., Malalasekera, W.: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman Scientific & Technical, Essex, 1995.
- [47] Patankar, S. V.: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York, 1980.
- [48] ...: *RUBITHERM GmbH*, (<http://www.rubitherm.com>), Hamburg, 2001.
- [49] Abhat, A.: *Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials*, Solar Energy, 30 (1983) 4, 313-332.
- [50] ...: *Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, EAL-R2 European cooperation for Accreditation in Laboratories, Geneva, 1997.
- [51] Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E.: *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1984.
- [52] Rohsenow, W. M., Hartnett, J. P., Ganić, E. N.: *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1985.
- [53] Minkowicz, W. J., Sparrow, E. M., Schneider, G. E., Pletcher, R. H.: *Handbook of Numerical Heat Transfer*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- [54] ...: *Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1950, Priručnik
- [55] Reid, R. C., Prausnitz, J. M., Poling, B. E.: *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill Book Company, New York, USA, 1988.

## POPIS OZNAKA

### Popis simbola

#### Latinični simboli

<b>A</b>		matrica diskretiziranog sustava jednadžbi
<i>A</i>	m <sup>2</sup>	površina
<i>a</i>	m <sup>2</sup> /s	koeficijent temperaturne vodljivosti
		susjedni koeficijent u matrici sustava
<b>B</b>		vektor izvora sustava diskretiziranih jednadžbi
<i>b</i>		izvor opće varijable
<i>c</i>	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet
<i>d</i>	m	promjer cijevi
<i>D</i>	m	promjer cijevi
		bezdimenzijska difuzijska vodljivost
<i>E</i>	W	eksergija
<i>F</i>		bezdimenzijski konvektivni fluks
<i>f</i>		omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline
<i>H</i>	J/m <sup>3</sup>	volumna entalpija
<i>I</i>		odsječak na aksijalnoj koordinatnoj osi
<i>i</i>		odsječak na aksijalnoj koordinatnoj osi
<i>J</i>		odsječak na radijalnoj koordinatnoj osi
<i>j</i>		odsječak na radijalnoj koordinatnoj osi
<i>L</i>	m	duljina cijevi
<i>M</i>		broj odsječaka na aksijalnoj koordinatnoj osi
<i>m</i>	kg	masa
<i>m</i>	kg/s	maseni protok
<i>N</i>		broj odsječaka na radijalnoj koordinatnoj osi
<i>P</i>		bezdimenzijski tlak
<i>p</i>	Pa	tlak

$Q$	J	toplina
$q$	J/kg	latentna toplina akumulatora topline
$\bar{q}$		bezdimenzijski toplinski tok
$R$		bezdimenzijska radijalna koordinata
$r$	m	radijalna koordinata
	m	polumjer cijevi
$S$		izvorni član sveden na jedinicu volumena
$S(X_i)$		standardna devijacija
$S(\bar{X}_i)$		standardna devijacija srednje vrijednosti
$T$	K	termodinamička temperatura
$t$	s	vrijeme
$u$		mjerna nesigurnost
$u(X_i)$		standardna pogreška
$V$	m <sup>3</sup>	volumen
$V(X_i)$		koeficijent varijacije
$W$		bezdimenzijska brzina
$w$	m/s	brzina strujanja fluida
$X$		bezdimenzijska aksijalna koordinata
$x$	m	aksijalna koordinata

### Grčki simboli

$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	koeficijent konvekcijskog prijelaza topline
$\chi$		bezdimenzijska entalpija
$\varepsilon$		kriterij točnosti
$\Phi$	W	toplinski tok
$\Gamma$		koeficijent difuzije opće varijable
$\eta_d$	Pas	dinamički viskozitet
$\eta$		eksergijska iskoristivost

$\vartheta$	°C	temperatura
$\lambda$	W/(mK)	koeficijent vodljivosti topline
$\Theta$		bezdimenzijska temperatura
$\theta$		bezdimenzijsko naprezanje
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$\tau$		bezdimenzijsko vrijeme
	Pa	smično naprezanje
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematički viskozitet
$\Psi$		opća varijabla

### Popis bezdimenzijskih značajki

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D_i}{\lambda_f} \quad \text{Nusseltova značajka}$$

$$Pe = \frac{w_{in} \cdot D_i}{a_f} \quad \text{Pecletova značajka}$$

$$Pr = \frac{\nu_f}{a_f} \quad \text{Prandtlova značajka}$$

$$Re = \frac{w_{in} \cdot D_i}{\nu_f} \quad \text{Reynoldsova značajka}$$

$$St = \frac{c_p \cdot (T_m - T_m)}{q} \quad \text{Stefanova značajka}$$

### Popis indeksa

c	spremanje topline
d	korištenje topline
e, w, n, s	granice kontrolnog volumena
E, W, N, S	susjedni čvorovi u diskretiziranoj domeni
f	fluid
i	unutarnji polumjer cijevi
in	ulaz

init	početni
L	kapljevito agregatno stanje akumulatora topline
m	taljenje
nb	susjedni koeficijent
o	vanjska površina latentnog spremnika
ok	okoliš
out	izlaz
p	akumulator topline
q	latentna topline akumulatora topline
r	radijalna koordinata
R	bezdimenzijska radijalna koordinata
s	kruto agregatno stanje akumulatora topline
w	stijenka
x	aksijalna koordinata
X	bezdimenzijska aksijalna koordinata

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Spremnik latentne topline .....	7
Slika 2.	Segment spremnika latentne topline .....	8
Slika 3.	Odsječak segmenta spremnika latentne topline .....	10
Slika 4.	Temperatura akumulatora topline u ovisnosti o volumnoj entalpiji .....	12
Slika 5.	Područje proračuna s pripadajućim diferencijalnim jednadžbama i rubnim uvjetima .....	20
Slika 6.	Mreža kontrolnih volumena elementarnog isječka spremnika latentne topline .....	23
Slika 7.	Razmještaj mreža kontrolnih volumena za proračun polja strujanja i temperaturnog polja .....	26
Slika 8.	Kontrolni volumen brzine $W_x$ s pripadnim susjednim brzinama .....	27
Slika 9.	Kontrolni volumen brzine $W_R$ s pripadnim susjednim brzinama .....	28
Slika 10.	Podjela radnih tvari za spremanje toplinske energije .....	50
Slika 11.	Eksperimentalna naprava s akvizicijskim sustavom .....	56
Slika 12.	Eksperimentalna naprava .....	57
Slika 13.	Zaslon računala tijekom mjerenja temperature .....	58
Slika 14.	Standardna devijacija .....	63
Slika 15.	Standardna pogreška .....	63
Slika 16.	Koeficijent varijacije .....	63
Slika 17.	Odstupanja mjerenih temperatura od temperature etalona .....	64
Slika 18.	Rasipanje temperatura oko aritmetičke sredine .....	64
Slika 19.	Odstupanja temperatura u odnosu na temperaturu etalona .....	65
Slika 20.	Smještaj termoparova unutar eksperimentalne naprave .....	68
Slika 21.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju .....	69
Slika 22.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju .....	70
Slika 23.	Rezultati analize uzorka parafina RT 30 dobiveni tehnikom plinske kromatografije .....	71
Slika 24.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju .....	72
Slika 25.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju .....	73
Slika 26.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju .....	74
Slika 27.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju .....	74
Slika 28.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju .....	75
Slika 29.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju .....	76
Slika 30.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	77



Slika 31.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	78
Slika 32.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	79
Slika 33.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	79
Slika 34.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	80
Slika 35.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	81
Slika 36.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 5 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	81
Slika 37.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 9 pri taljenju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	82
Slika 38.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	83
Slika 39.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	83
Slika 40.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 2 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	84
Slika 41.	Vremenska promjena temperature akumulatora topline na mjernom mjestu 15 pri skrućivanju dobivena numeričkim proračunom i eksperimentom ..	84
Slika 42.	Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za $Re = 657$ ..	85
Slika 43.	Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za $Re = 1970$ ..	86
Slika 44.	Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi za $Re = 657$ i $Re = 1970$ ..	87
Slika 45.	Promjena lokalne Nusseltove značajke duž cijevi prilikom taljenja i prilikom skrućivanja akumulatora topline ..	87
Slika 46.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	88
Slika 47.	Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	89
Slika 48.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	90
Slika 49.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	92
Slika 50.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	94
Slika 51.	Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	95
Slika 52.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	95

Slika 53.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	97
Slika 54.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,42$ ..	99
Slika 55.	Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,42$ ..	100
Slika 56.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,42$ ..	101
Slika 57.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,42$ ..	103
Slika 58.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,4$ ..	105
Slika 59.	Granice taljenja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,4$ ..	106
Slika 60.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,4$ ..	106
Slika 61.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ pri taljenju akumulatora topline unutar temperaturnog intervala $0 - 0,4$ ..	108
Slika 62.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	111
Slika 63.	Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	112
Slika 64.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	113
Slika 65.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 657$ ..	115
Slika 66.	Radikalna raspodjela bezdimenzijskih temperatura na udaljenosti $X = 12,73$ u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	117
Slika 67.	Granice skrućivanja akumulatora topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	118
Slika 68.	Izoterme bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika topline u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	119
Slika 69.	Prostorne raspodjele bezdimenzijskih temperatura unutar spremnika u različitim bezdimenzijskim vremenima za $Re = 1970$ ..	121
Slika 70.	Utjecaj $Re$ na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja ..	126
Slika 71.	Utjecaj $Re$ na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja ..	126

Slika 72.	Utjecaj $Re$ na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja .....	127
Slika 73.	Utjecaj $Re$ na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline .....	128
Slika 74.	Utjecaj $Re$ na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	129
Slika 75.	Utjecaj $Re$ na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	129
Slika 76.	Utjecaj $Re$ na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	130
Slika 77.	Utjecaj $Re$ na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline .....	130
Slika 78.	Utjecaj temperaturne razlike na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	131
Slika 79.	Utjecaj temperaturne razlike na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	132
Slika 80.	Utjecaj temperaturne razlike na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja .....	133
Slika 81.	Utjecaj temperaturne razlike na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline .....	133
Slika 82.	Utjecaj temperaturne razlike na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	134
Slika 83.	Utjecaj temperaturne razlike na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	135
Slika 84.	Utjecaj temperaturne razlike na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	135
Slika 85.	Utjecaj temperaturne razlike na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline .....	136
Slika 86.	Utjecaj duljine cijevi na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	137
Slika 87.	Utjecaj duljine cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	137
Slika 88.	Utjecaj duljine cijevi na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja .....	138
Slika 89.	Utjecaj duljine cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline .....	138
Slika 90.	Utjecaj duljine cijevi na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	139
Slika 91.	Utjecaj duljine cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	140
Slika 92.	Utjecaj duljine cijevi na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	140
Slika 93.	Utjecaj duljine cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline .....	141
Slika 94.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	142

Slika 95.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu taljenja .....	142
Slika 96.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu taljenja .....	143
Slika 97.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu taljenja akumulatora topline .....	143
Slika 98.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	144
Slika 99.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na specifičnu toplinu akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	145
Slika 100.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline pri procesu skrućivanja .....	145
Slika 101.	Utjecaj unutarnjeg radijusa vanjske cijevi na eksergijsku iskoristivost pri procesu skrućivanja akumulatora topline .....	146
Slika 102.	Utjecaj vremena taljenja na ukupnu spremljenu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline .....	147
Slika 103.	Utjecaj vremena taljenja na specifičnu toplinu akumulatora topline .....	147
Slika 104.	Utjecaj vremena taljenja na omjer ukupne spremljene topline i latentne topline akumulatora topline .....	148
Slika 105.	Utjecaj vremena taljenja akumulatora topline na eksergijsku iskoristivost spremnika .....	148
Slika 106.	Utjecaj vremena skrućivanja na ukupnu predanu toplinu i latentnu toplinu akumulatora topline .....	149
Slika 107.	Utjecaj vremena skrućivanja na specifičnu toplinu akumulatora topline .....	150
Slika 108.	Utjecaj vremena skrućivanja na omjer ukupne predane topline i latentne topline akumulatora topline .....	150
Slika 109.	Utjecaj vremena skrućivanja akumulatora topline na eksergijsku iskoristivost spremnika .....	151

## POPIS TABLICA

Tablica 1.	Fizikalna svojstva parafina koji su u primjeni kao radne tvari za spremanje toplinske energije .....	51
Tablica 2.	Fizikalna svojstva masnih kiselina kao akumulatora topline .....	52
Tablica 3.	Fizikalna svojstva hidrata soli kao akumulatora topline .....	52
Tablica 4.	Zamjenska sredstva za upotrebu s anorganskim hidratima soli .....	53
Tablica 5.	Nukleacijski posrednici za dodavanje anorganskim hidratima soli .....	53
Tablica 6.	Fizikalna svojstva nekih eutektika koji su u primjeni kao akumulatori topline .....	54
Tablica 7.	Utjecaj korozije akumulatora topline na konvencionalne konstrukcijske materijale spremnika .....	55
Tablica 8.	Umjeravanje termoelemenata .....	62
Tablica 9.	Maseni udjeli i temperature taljenja najzastupljenijih alkana u parafinskoj smjesi .....	71

## ŽIVOTOPIS

Anica Trp rođena je 20. srpnja 1967. godine u Rijeci, Republika Hrvatska.

Osnovnu i srednju školu završila je u Rijeci, gdje je maturirala 1986. godine. Studij strojarstva završila je 1991. na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci gdje je 1996. godine obranila i magistarski rad pod naslovom *Termodinamička analiza toplinskih pojava kod rotirajućeg regeneratorsa topline u sustavu termoelektrane srednje snage*.

Od 1. studenoga 1991. godine zaposlena je na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u svojstvu znanstvenoga novaka na znanstvenim projektima *Energetski i ekološki pristup zbrinjavanju otpada priobalnog područja (2-08-350)* i *Primjena obnovljivih izvora energije u priobalnom području (069005)*. U sklopu rada na predmetnom znanstvenom projektu bila je uključena u rad istraživačkoga tima Tehničkoga fakulteta na bilateralnom projektu hrvatsko-slovenske znanstvene suradnje *Istraživanje mogućnosti održivog razvoja energetike s ciljem zaštite okoliša*, te u rad znanstvenoga projekta pri zajedničkom istraživanju s Energetskim institutom "Hrvoje Požar" te Institutom "Ruđer Bošković" - *Korištenje sunčeve energije u Hrvatskoj - SUNEN*. Voditelj je poticajnoga projekta za mlade znanstvenike *Akumulacija topline u latentnim spremnicima (069107)*.

Od školske godine 1993/94. uključena je u nastavu na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci i to u kolegijima *Nauka o toplini I*, *Nauka o toplini II*, *Osnove nauke o toplini*, *Toplinski aparati i uređaji* i *Laboratorijske vježbe* na sveučilišnom studiju strojarstva, brodogradnje i elektrotehnike, te *Toplina* i *Rashladni uređaji* na stručnom studiju strojarstva i brodogradnje.

Od 1993. godine članica je *Uredničkog odbora Zbornika Tehničkoga fakulteta Rijeka* odnosno od 1995. godine znanstvenoga časopisa *Engineering Review*. Aktivno se služi engleskim jezikom.

U svojstvu autora ili koautora objavila je petnaest znanstvenih radova.

## PODACI O AUTORU I DOKTORSKOJ DISERTACIJI

### 1. AUTOR

Ime i prezime:	Anica Trp
Datum i mjesto rođenja:	20. srpnja 1967., Rijeka, Hrvatska
Naziv fakulteta, studija i godina završetka dodiplomskog studija:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, sveučilišni studij strojarstva, 1991.
Naziv fakulteta, smjera i godina završetka poslijediplomskog studija:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci, smjer Toplinska tehnika, 1996.
Sadašnje zaposlenje:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

### 2. DOKTORSKA DISERTACIJA

Naslov:	Termodinamička analiza akumulacije topline u latentnom spremniku
Broj stranica, slika, tablica i bibliografskih podataka:	167, 109, 9, 55
Znanstveno polje i grana:	Druge temeljne tehničke znanosti, Termodinamika
Voditelj rada:	Red. prof. dr. sc. Bernard Franković
Fakultet na kojem je rad obranjen:	Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci

### 3. OBRANA I OCJENA

Datum prijave teme:	8. srpnja 1996.
Datum predaje rada:	18. veljače 2002.
Datum prihvatanja ocjene rada:	13. lipnja 2002.
Sastav Povjerenstva za ocjenu:	Red.prof.dr.sc. Vladimir Medica, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Bernard Franković, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Ivan Viličić, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Antun Galović, dipl.ing.
Datum obrane:	28. lipnja 2002.
Sastav Povjerenstva za obranu:	Red.prof.dr.sc. Vladimir Medica, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Bernard Franković, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Ivan Viličić, dipl.ing. Red.prof.dr.sc. Antun Galović, dipl.ing.
Datum promocije:	_____

Oznaka: DD Tek. broj:

UDK 536.65.001.53:536.27:519.63:681.3.06(043)

**TERMODINAMIČKA ANALIZA AKUMULACIJE TOPLINE  
U LATENTNOM SPREMNiku**

Anica Trp

Sveučilište u Rijeci  
Tehnički fakultet  
Hrvatska

Ključne riječi: spremnik latentne topline  
matematički model nestacionarne izmjene topline  
eksperimentalna istraživanja  
eksergijska iskoristivost

Sažetak:

U radu je analiziran fizikalni proces nestacionarne izmjene topline unutar latentnog spremnika. Postavljeni je matematički model, kojeg čine diferencijalne jednačbe strujanja i prijelaza topline fluida, diferencijalna jednačba provođenja topline kroz stijenku te diferencijalna entalpijska jednačba akumulatora topline, uz definirane početne i rubne uvjete, diskretiziran primjenom numeričke metode kontrolnih volumena, a dobiveni su sustavi algebarskih jednačbi riješeni iteracijski kompjuterskim programom napisanim u programskom jeziku *Fortran*-u. Usporedbom rezultata dobivenih numeričkim i eksperimentalnim putem za konstruirani model latentnog spremnika utvrđeno je dobro međusobno slaganje. Za određivanje iskoristivosti primijenjena je eksergijska analiza. Numeričkim su proračunom dobivena temperaturna polja te fronte širenja područja taljenja odnosno skrućivanja u različitim vremenskim intervalima čime je simulirano toplinsko ponašanje spremnika pri spremanju i korištenju topline. Nizom numeričkih proračuna u radu je analiziran i utjecaj različitih pogonskih uvjeta i konstrukcijskih parametara na količinu spremljene odnosno iskorištene topline te eksergijsku iskoristivost latentnog spremnika.

Rad nije objavljen.

Mentor: Red. prof. dr. sc. Bernard Franković  
Povjerenstvo za ocjenu: Red. prof. dr. sc. Vladimir Medica  
Red. prof. dr. sc. Bernard Franković  
Red. prof. dr. sc. Ivan Viličić  
Red. prof. dr. sc. Antun Galović  
Povjerenstvo za obranu: Red. prof. dr. sc. Vladimir Medica  
Red. prof. dr. sc. Bernard Franković  
Red. prof. dr. sc. Ivan Viličić  
Red. prof. dr. sc. Antun Galović

Datum obrane: 28. lipnja 2002.

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Rad je pohranjen na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci.

(167 stranica, 109 slika, 9 tablica i 55 bibliografskih podataka, original na hrvatskom jeziku)

UDK 536.65.001.53:536.27:519.63:  
681.3.06(043)

Ključne riječi:

spremnik latentne topline

matematički model nestacionarne

izmjenjive topline

eksperimentalna istraživanja

eksperimentalna iskoristivost

I. Termodinamička analiza akumulacije

topline u latentnom spremniku

I Trp A.

II Sveučilište u Rijeci

Tehnički fakultet

Hrvatska

DD

Code: DD No.

UDC 536.65.001.53:536.27:519.63:681.3.06(043)

## A THERMODYNAMIC ANALYSIS OF HEAT STORAGE IN A LATENT HEAT STORAGE UNIT

Anica Trp

University of Rijeka  
Faculty of Engineering  
Croatia

Key words: latent heat storage unit  
mathematical model of transient heat transfer  
experimental investigations  
exergy efficiency

### Summary:

A physical process of transient heat transfer in the latent heat storage unit has been analysed in this paper. A defined mathematical model, made up of the differential equations of flow and heat transfer of the heat transfer fluid, differential equation of heat conduction through the wall and differential enthalpy equation of the phase change material, with initial and boundary conditions, has been discretised by a control volume approach. The obtained set of algebraic equations has been solved by *Fortran* software using the iterative procedure. A comparison of the obtained numerical and experimental results for constructed latent heat storage model shows mutual agreement. An exergy analysis has been applied for determining the efficiency of the storage unit. Temperature fields and melting i.e. solidification fronts in different time periods have been obtained numerically and thermal behaviour during charging and discharging of the heat storage unit has been simulated. A series of numerical procedures has been performed in order to analyse the influence of different operating conditions and construction parameters on the amount of charged i.e. discharged energy and exergy efficiency of the latent heat storage unit.

This thesis has not been published.

Mentor: Prof. Bernard Franković, D. Sc.  
Advisors: Prof. Vladimir Medica, D. Sc.  
Prof. Bernard Franković, D. Sc.  
Prof. Ivan Viličić, D. Sc.  
Prof. Antun Galović, D. Sc.  
Reviewers: Prof. Vladimir Medica, D. Sc.  
Prof. Bernard Franković, D. Sc.  
Prof. Ivan Viličić, D. Sc.  
Prof. Antun Galović, D. Sc.

Presentation: June 28, 2002

Degree conferred: \_\_\_\_\_

This thesis is deposited in the library of the University of Rijeka, Faculty of Engineering.

(167 pages, 109 pictures, 9 tables and 55 references, original in Croatian)

DD

1. A thermodynamic analysis of heat storage  
in a latent heat storage unit

I Trp A.

II University of Rijeka  
Faculty of Engineering  
Croatia

UDC 536.65.001.53:536.27:519.63:  
681.3.06(043)

Key words:

latent heat storage unit  
mathematical model of transient  
heat transfer  
experimental investigations  
exergy efficiency