

Simulacija pogona visoko-temperaturnog spremnika latentne topline

Molnar, Mineo

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:318410>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mineo Molnar

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. Sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Mineo Molnar

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof.dr.sc. Draženu Lončaru i dr.sc. Anti Marušiću na ukazanom povjerenju, strpljenju i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svim profesorima na čijima sam predavanjima u dosadašnjem dijelu svoga školovanja imao priliku prisustvovati.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji i djevojci Teni na ljubavi, poštovanju, nadanju, podršci i predanosti.

Mineo Molnar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Mineo Molnar**

Mat. br.: 0035199762

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Simulacija pogona visoko-temperaturnog spremnika latentne topline**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Simulation of operation of high temperature latent heat storage**

Opis zadatka:

S povećanjem udjela intermitentnih obnovljivih izvora povećava se značaj pohrane energije u energetskim sustavima. Izgradnja i pogon solarnih termoelektrana potaknula je i razvoj toplinskih spremnika. Najvišu gustoću pohrane energije omogućavaju visoko-temperaturni spremnici latentne topline u kojima se najčešće kao medij koriste tzv. solarne soli.

Nepovoljna značajka visoko-temperaturnih spremnika latentne topline je relativno spor dinamički odziv te se prilikom projektiranja izvedba spremnika prilagođava dinamičkim značajkama solarne termoelektrane u cilju postizanja traženih performansi postrojenja u cjelini. Zbog izrazito nestacionarne prirode procesa pohrane i oslobađanja toplinske energije projektiranje spremnika podrazumijeva i simulacije dinamike sustava.

U okviru ovog rada potrebno je:

1. Izvesti matematički model dinamike termohidrauličkih procesa u spremniku latentne topline koji je izveden s kapsulama ispunjenim solarnom soli;
2. Spregnuti izvedeni model s pojednostavljenim modelom solarne termoelektrane snage 50 MW;
3. Simulirati višednevni pogon postrojenja u uvjetima promjenjivog sunčevog zračenja;
4. Simulacijski usporediti utjecaj konstrukcijskih parametara visoko-temperaturnog spremnika latentne topline i to: dimenzija kapsule, dimenzija spremnika te vrste solarne soli na dinamičke pogonske značajke postrojenja.

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

Zadatak zadan:

26. rujna 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar

Datum predaje rada:

28. studenoga 2019.

Predvideni datum obrane:

2. – 6. prosinca 2019.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	II
Popis tablica	IV
Popis oznaka.....	V
Sažetak	VII
Summary	VIII
1. Uvod	1
2. Elektrane s koncentriranim sunčevim zračenjem	2
3. Tehnologije pohrane toplinske energije	6
4. Metode poboljšanja performansi LHTES-a	11
5. Matematički model.....	15
5.1. Kolektorsko polje, parno-turbinsko postrojenje i cjevovodi	17
5.2. Spremnik latentne topline.....	22
6. Simulacija pogona	32
6.1. Utjecaj konstrukcijskih parametara TES-a.....	34
6.2. Dinamičke značajke postrojenja.....	42
7. Zaključak	47
Literatura	48
Prilog	52

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz CSP postrojenja [4]	2
Slika 2. Status CSP postrojenja u svijetu, 2008-2018 [7]	3
Slika 3. Globalni kapaciteti spremnika toplinske energije	3
Slika 4. Načini skladištenja topline [18]	6
Slika 5. Podjela materijala za pohranu latentne topline, prema [23].....	8
Slika 6. Mehanizmi poboljšanja performansi sustava pohrane s PCM-om [23].....	11
Slika 7. Povećanje površine izmjene topline korištenjem cijevi s rebrima	12
Slika 8. Neke od mogućih izvedbi kapsula s PCM-om: a) traka s kapsulama [27], b) orebreni aluminijski profili [27], c) sferične kapsule od nehrđajućeg čelika [17] i d) cilindrične kapsule [28].	13
Slika 9. Proces popunjavanja pora tijekom fazne pretvorbe PCM-a [11].....	14
Slika 10. Ilustracija tlocrta modelirane elektrane (gore) i središnji detalj (dolje).....	15
Slika 11. Shema modelirane elektrane	16
Slika 12. Model kolektorskog polja	18
Slika 13. Pojednostavljeni model parno-turbinskog postrojenja.....	19
Slika 14. Toplinski tokovi u modelu cjevovoda.....	19
Slika 15. Skica poprečnog presjeka spremnika (lijevo) i kapsule (desno).....	22
Slika 16. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o masenom protoku, za razne promjere spremnika D i kapsula d	25
Slika 17. Diskretizacija kapsule	25
Slika 18. Detalj kapsule uz prikaz karakterističnih trokuta.....	26
Slika 19. Metoda određivanja gustoće PCM-a.....	28
Slika 20. Odabir režima rada.....	33
Slika 21. Primljena i izdana energija spremnika, tijekom 4 dana	33
Slika 22. Profil direktnog sunčevog zračenja korišten za dimenzioniranje spremnika.....	34
Slika 23. Temperature ulja u spremniku za KNO_3 kao PCM, $D_{\text{spremnik}} = 30 \text{ m}$ te $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$.	35
Slika 24. Temperature ulja u spremniku za KOH kao PCM, $D_{\text{spremnik}} = 30 \text{ m}$ te $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$..	36
Slika 25. Kaskadni sustav s dvije vrste PCM-a.....	36
Slika 26. Temperature ulja u spremniku za kaskadnu izvedbu, $D_{\text{spremnik}} = 25 \text{ m}$ te $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$..	37
Slika 27. Temperature ulja u spremniku za kaskadnu izvedbu, $D_{\text{spremnik}} = 25 \text{ m}$ te $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$, uvećani prikaz	38
Slika 28. Temperature ulja i slojeva soli (gore) i udjeli krute faze u 7. sloju spremnika (dolje)	39

Slika 29. Srednja temperatura, srednji udio krute faze i relativna promjena volumena soli u 7. sloju spremnika	39
Slika 30. Visina soli [mm] u kapsuli 7. sloja spremnika, prije i nakon fazne pretvorbe.....	40
Slika 31. Temperatura ulja, srednja temperatura soli i srednji udio krute faze 10. sloja spremnika, u vrijeme pražnjenja, za različite veličine kapsula	40
Slika 32. Radijacija i gubici u PTC-u (gore), temperature u PTC-u (sredina) i maseni protoci u postrojenju (dolje)	42
Slika 33. Temperature ulja u TES-u (gore) i SG-u (sredina) te toplinska snaga dodatnog grijača i snaga na električnom generatoru.....	43
Slika 34. Mjesečne količine proizvedene el. energije i ukupne insolacije	44
Slika 35. Regulacija povećanja protoka prema SG-u u režimu punjenja.....	45
Slika 36. Regulacija zakretanja zrcala.....	45
Slika 37. 24-satni režim rada tijekom ljetnih dana.....	46

Popis tablica

Tablica 1. Vrste CSP tehnologija [12,13,14,15,16]	5
Tablica 2. Primjeri medija za pohranu osjetne topline [11]	7
Tablica 3. Primjeri medija za pohranu latentne topline [11]	9
Tablica 4. Materijali za termokemijsku pohranu i pripadajuće reakcije [11]	10
Tablica 5. Vrijednosti projektnih parametara generatora pare	16
Tablica 6. Dimenzije cjevovoda	21
Tablica 7. Svojstva razmatranih soli [11,40,41,42,43,44,45]	35
Tablica 8. Usporedba karakteristika ovdje modeliranog i postojećeg TES sustava u Andasol 1	41

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
c	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet
h	J/kg	entalpija
m	kg/s	maseni protok
r	m	polumjer
t	s	vrijeme
x	-	udio krute faze
A	m ²	površina
D	m	promjer
L	m	duljina
M	kg	masa
V	m ³	volumen
α	W/(m ² K)	koeficijent prijelaza topline
δ	m	debljina
ϑ	°C	temperatura
λ	W/(mK)	toplinska provodnost
μ	Pas	dinamička viskoznost
ρ	kg/m ³	gustoća
j_H	-	Colburnov faktor
Pr	-	Prandtllov broj
Re	-	Reynoldsov broj

Kratica / indeks	Opis
i	redni broj sloja u spremniku (počevši odozgora)
is	isječak (kuglin)
j	redni broj sloja PCM-a u kapsula (počevši od sredine)
k	kapsula
kar	karakteristični
ok	okolina
sl	sloj
st	stjenka
u	unutarnji
uk	ukupno
v	vanjski
zr	zrak
CSP	concentrated solar power
F	fluid
HTF	heat transfer fluid
LHTES	latent heat thermal energy storage
PCM	phase change material
PTC	parabolic trough collector
SG	steam generator
TES	thermal energy storage

Sažetak

Primjena spremnika latentne topline u elektranama s koncentriranim sunčevim zračenjem osigurava visoku gustoću pohranjene energije. S druge strane, niska toplinska provodnost solarnih soli, kao medija pohrane topline, predstavlja svojevrstan tehnološki nedostatak. Jedan od načina rješavanja tog problema je smještanje spomenutih soli u kapsule raznih oblika i veličina. U ovome radu, korištenjem računalnog paketa Matlab, napravljen je pojednostavljeni model solarne termoelektrane snage 50 MW. U sklopu njega matematički je modeliran sustav s 4 paralelna visoko-temperaturna spremnika latentne topline sa sferičnim kapsulama. Unutrašnjost spremnika i kapsula prostorno je diskretizirana, pri čemu je u obzir uzet utjecaj promjene volumena šupljine u samim kapsulama. Za medij fazne pretvorbe razmatrani su kalijev nitrat (KNO_3) i kalijev hidroksid (KOH) te njihova kombinacija. Iterativnim metodama određen je optimalni volumen spremnika i dana je usporedba kapsula vanjskog promjera 1, 3 i 5 cm. Prikazani su međusobni utjecaji dinamičkih značajki komponenata postrojenja, te su na temelju istih izneseni zaključci.

Ključne riječi: sunčevo zračenje, latentna toplina, kapsule, solarna termoelektrana

Summary

The application of latent heat thermal energy storage in concentrated solar power plants provides a stored energy of a high density. On the other hand, the low thermal conductivity of solar salts as a storage medium is their main technological disadvantage. One way to solve this problem is by placing aforementioned salts in the capsules of various shapes and sizes. In this paper, a simplified model of a 50 MW solar thermal power plant was constructed using a Matlab software. Within said model, a system of 4 parallel high-temperature latent heat storage tanks with spherical capsules was modeled mathematically. The tank and capsules are spatially discretized, taking into account the influence of the volumetric change of capsule internal void. Potassium nitrate (KNO_3), potassium hydroxide (KOH) and their combination were considered for the phase change material. The optimal volume of the tank was determined by iterative methods and a comparison of capsules with an outer diameter of 1, 3 and 5 cm was given. The conclusions were derived from the interactions of the dynamic performance within the plant components.

Keywords: solar radiation, latent heat, capsules, solar thermal power plant

1. Uvod

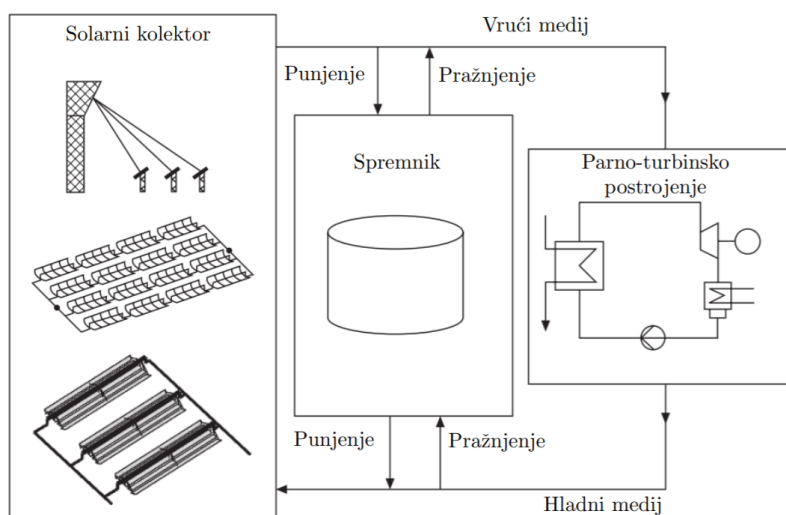
Kontinuiran porast životnog standarda na cijeloj Zemlji popraćen je povećanjem potrošnje energije. Pošto su još uvijek najčešće korišteni primarni oblici energije fosilna goriva, koja sa sobom neposredno nose i velike emisije štetnih plinova poput CO₂, NO_x i SO_x spojeva, klimatske promjene postaju jedan od ključnih faktora za dobrobit budućnosti čovječanstva. Odgovor na pitanje održivog razvoja leži u proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora poput vjetra, sunca, hidroenergije i geotermalne energije, a razlog značajnog smanjenja cijena tehnologija obnovljivih izvora zadnjih godina može se pripisati povećanom ulaganju u istraživanje i razvoj. Posebice je zanimljivo Sunčevo zračenje, koje kao čist i pouzdan izvor energije dobiva sve veću pažnju u mnogim zemljama svijeta. [1]

Međutim, zbog klimatske intermitencije, način je skladištenja ovih oblika obnovljive energije postao od velikog značaja. To je dovelo do razvoja efikasnih i održivih izvedbi spremnika energije, što je postalo važan dio sustava tehnologije obnovljivih izvora. Skladištenje toplinske energije (eng. thermal energy storage – TES) je tehnologija spremanja viška toplinske energije grijanjem ili hlađenjem adekvatnog materijala ili kombinacije materijala za kasnije korištenje u svrhu grijanja, hlađenja, generacije električne ili druge energije. TES sustavi su naročito korišteni u zgradarstvu i industrijskim procesima. Posljedica korištenja TES-a u energetsom sustavu je povećanje ukupne iskoristivosti i pouzdanosti, koje vodi k ekonomičnijem poslovanju zbog smanjenih troškova rada sustava i posredno manjem zagađenju okoliša. Posebno važnu ulogu spremnici topline našli su u postrojenjima na koncentrirano sunčevo zračenje (eng. concentrating solar power plants – CSP), gdje toplina potekla od Sunca može biti pohranjena za proizvodnju električne energije u kasnijim satima (navečer), kada sunčevo zračenje više nije dostupno. Procijenjeno je da ekstenzivnom uporabom spremnika „tople“ i „hladne“ energije u zgradarstvu i industrijskom sektoru u Europi godišnje može biti uštedeno oko 1.4 milijuna GWh te izbjegnuto 400 milijuna tona CO₂ emisija. Mnogo je istraživanja u zadnje vrijeme posvećeno materijalima s promjenom faze, čija ih visoka gustoća pohranjene energije čini dobrim kandidatom u velikom broju sustava pohrane topline. [2,3]

U ovome je radu napravljen model CSP-a snage 50 MW i pripadajućih spremnika topline te je implementiran matematički model termohidrauličkih procesa u visokotemperaturnom spremniku latentne topline. Simulacijama u programu Matlab istražen je utjecaj konstrukcijskih parametara spremnika na dinamiku cijelog postrojenja.

2. Elektrane s koncentriranim sunčevim zračenjem

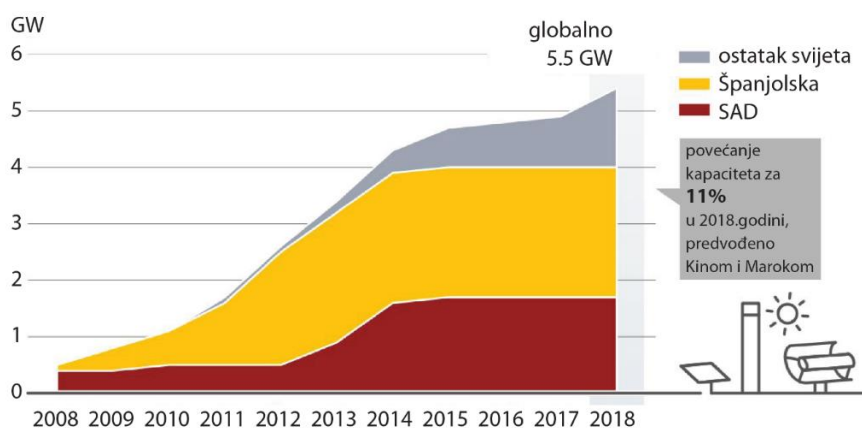
Tehnologija koncentriranja sunčevog zračenja u većini današnjih CSP postrojenja podrazumijeva koncentraciju zračenja pomoću zrcala ili leća s ciljem zagrijavanja medija za prijenos topline (eng. heat transfer fluid – HTF), koji dalje preko skupine izmjenjivača zagrijavanjem napojne vode proizvodi paru. Para dalje u sklopu Rankinovog procesa, na isti način kao i u konvencionalnim elektranama, preko turbine i el. generatora proizvodi el. energiju za potrebe referentnog elektroenergetskog sustava. Prednost CSP-a je korištenje sunčeve energije kao izvora topline umjesto energije proizašle iz izgaranja fosilnih goriva ili nuklearnih reakcija. Načelni prikaz sheme postrojenja prikazan je na slici 1. [3]



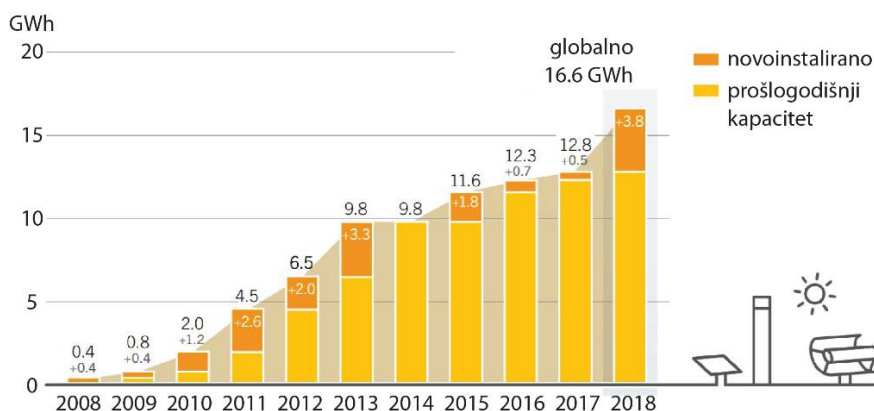
Slika 1. Shematski prikaz CSP postrojenja [4]

Dodatna pogodnost CSP elektrane je mogućnost ugradnje sustava skladištenja topline kako bi se el. energija mogla proizvoditi čak i za vrijeme oblačnog neba te nakon zalaska sunca. Prethodno doprinosi značajnom povećanju proizvodnih kapaciteta CSP-a u usporedbi s fotonaponom i, što je još bitnije, omogućuje proizvodnju el. energije s minimalnim fluktuacijama, što olakšava pravilno vođenje elektroenergetskog sustava i pridonosi kompetitivnosti postrojenja među ponuđačima na tržištu el. energije. S druge strane, parno-turbinski dio postrojenja se zasniva za već zreloj tehnologiji, gdje se u budućnosti ne može očekivati značajno smanjenje investicijskih i operativnih troškova. Valja napomenuti i problem prljanja zrcala. Kako akumulacija prljavštine ne bi uzrokovala smanjenje proizvodnje energije, zrcala je potrebno redovito ispirati. [3,5,6]

Komercijalizacija CSP-a je u porastu. Primjer toga je povećanje globalnih kapaciteta sa 400 MW u 2008. godini na 5500 MW u 2018. godini, slika 2. Globalni lideri su Španjolska s 2300 MW i SAD s 1738 MW i čine oko 75% svih kapaciteta. U 2018. godini najviše novoinstaliranih kapaciteta bilo je u Kini i Maroku, iza kojih slijede Južna Afrika i Saudijska Arabija. Sva tri sagrađena postrojenja u Kini 2018. godine imaju integriran sustav skladištenja energije: 100 MW Shouhang Dunhuang Phase II (11 sati TES), 50 MW Supcon Delingha (7 sati TES) i 50 MW CGN Delingha (9 sati TES). Na slici 3 se može vidjeti porast globalnih kapaciteta TES sustava u CSP postrojenjima u razdoblju 2008-2018. [7]



Slika 2. Status CSP postrojenja u svijetu, 2008-2018 [7]



Slika 3. Globalni kapaciteti spremnika toplinske energije u sklopu CSP postrojenja, 2008-2018 [7]

U svrhu postizanja željene efikasnosti i energetske kapaciteta TES-a, razvijena su različita konstrukcijska rješenja sustava. Općenito, ti se sustavi kategoriziraju u dvije grupe: aktivne, gdje je medij za pohranu topline tekućina (ili plin) i tijekom rada struji između dva spremnika,

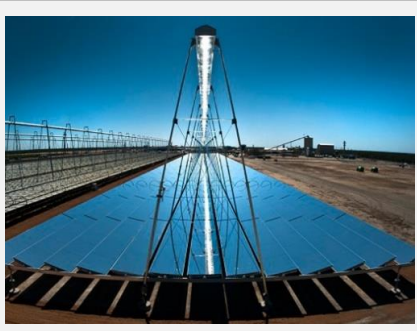
i pasivne, gdje je medij pohrane uvijek sadržan unutar jednog spremnika, a HTF tijekom procesa punjenja i pražnjenja struji kroz spremnik. [8]

Sustav s direktnom pohranom koristi isti medij za prijenos i pohranu topline (HTF). Tijekom procesa punjenja, HTF iz hladnog spremnika struji prema polju solarnih kolektora kako bi se zagrijao te naposljetku pohranio u topli spremnik. Tijekom pražnjenja fluid iz toplog spremnika koristi se kao izvor topline u parno-turbinskom procesu, nakon čega se ponovno sprema u hladni spremnik. Aktivni sustav s indirektnom pohranom također ima dva spremnika, no koristi različite medije za prijenos topline (HTF) i pohranu topline (solarne soli). U trenucima kada je toplinski tok na izlazu iz kolektorskog polja veći od onog koji je potreban proizvodnju pare predodređenih parametara u generatoru pare, višak protoka se usmjerava prema izmjenjivaču topline putem kojeg se toplina HTF-a predaje rastaljenoj soli, koja se tada sprema u topli spremnik. U trenucima smanjene insolacije, odnosno kada je protok na izlazu iz kolektorskog polja manji od nazivnog, koristi se energija soli iz toplog spremnika za zagrijavanje HTF-a koji napaja generator pare. Ohlađena se sol sprema u hladni spremnik topline te čeka slijedeći ciklus njena zagrijavanja (slijedeći dan). Ovakav sustav je primjenu našao i u solarnoj elektrani Andasol 1, prema čijim će parametrima u glavnom dijelu rada biti modelirano postrojenje, no s drugačijom tehnologijom spremanja topline. Umjesto sintetičkog ulja, kao medij pohrane topline može se koristiti i voda te pritom spremnik služi kao akumulator pare. Takvi su sustavi prikladni za CSP postrojenja s direktnom proizvodnjom pare, gdje para generirana u kolektorskom polju služi i kao medij u parno-turbinskom procesu. Razlika između proizvedene i potrebne pare sprema se u akumulator za kasnije korištenje. Iz razloga što ovakvi sustavi zahtijevaju visokotlačne spremnike, a gustoća pohranjene energije je niska, korisni su samo kada je potreban mali kapacitet pohrane (npr. u vrijeme kratkotrajne naoblake). [5,9,10,11]

Pasivne sustave karakterizira temperaturna stratifikacija unutar spremnika i najčešće su izvedeni samo s jednim spremnikom u kojem medij za pohranu topline miruje. Tijekom punjenja, topli HTF ulazi pri vrhu spremnika i kroz dno potiskuje hladni prema van, dok tijekom pražnjenja HTF struji u suprotnom smjeru. Ovisno o kontaktu i prijenosu topline između HTF-a i medija za pohranu, sustav može biti izveden na dva načina. Kod prvog tipa HTF struji duž cijevi koje se protežu kroz materijal za pohranu. Drugi uključuje guste nakupine čvrstih materijala (kao što su šljunak, metalni oblutci ili kapsule ispunjene PCM-om) unutar spremnika. Čvrsti materijal tada čini poroznu strukturu kroz koju struji HTF, a izmjena topline je vrlo učinkovita. [9]

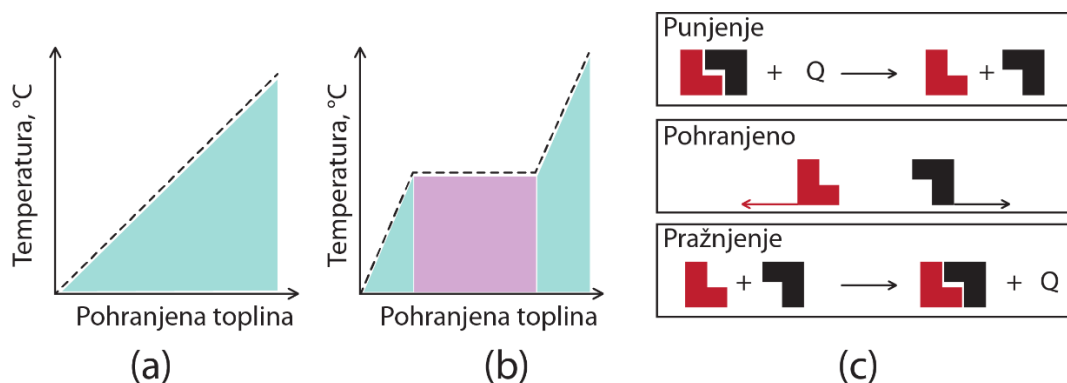
CSP postrojenja mogu se podijeliti u dvije grupe, ovisno o tome koncentriraju li solarni kolektori sunčeve zrake duž žarišne linije ili u jednu točku. Linijsko usmjereni sustavi su parabolički kolektori (eng. parabolic trough collectors - PTC) i linearni Fresnel kolektori, koji imaju jedno-osni sustav praćenja sunca. Točkasto usmjereni sustavi su solarni tanjur (eng. solar dish) i sustavi heliostata sa solarnim tornjem (eng. solar tower) koji imaju mogućnost dvo-osnog praćenja. U tablici 1 prikazani su i ukratko opisani navedeni sustavi. [3]

Tablica 1. Vrste CSP tehnologija [12,13,14,15,16]

Parabolički kolektori 100 – 450 °C Visoka komercijalna popularnost		Cijevni apsorber je duž fokalne linije niza paraboličkih zrcala koja prate položaj sunca tijekom dana. Takav sustav može zagrijavati HTF poput sintetičkog ulja, ili direktno proizvoditi paru prije njenog ulaska u turbinu.
Linearni Fresnel kolektori 100 – 450 °C Osrednja komercijalna popularnost		Tehnologija koja je slična paraboličkim kolektorima. Dugačka i blago zakrivljena zrcala posložena u paralelne redove reflektiraju zračenje u linearni nepomični apsorber. Osim ulja, zagrijavani medij također može biti i napojna voda.
Heliostati i solarni toranj 300 – 2000 °C Osrednja / visoka komercijalna popularnost		Mnogo individualnih zakrivljenih zrcala (heliostata) sinkronizirano se pomiču, reflektirajući sunčevo zračenje u jedan apsorber na vrhu tornja, gdje temperatura obično doseže oko 600 °C. Medij za prijenos topline je najčešće solarna sol.
Solarni tanjur 300 – 2000 °C Niska komercijalna popularnost		Tanjurasto zrcalo reflektira zračenje u središnji apsorber koji se tijekom dana pomiče zajedno sa zrcalom. Apsorber direktno služi kao izvor topline u malom stirlingovom motoru, koji je spojen na el. generator. Iako je efikasniji od solarnog tornja, ovakav sustav danas, zbog visoke cijene, teško pronalazi komercijalnu primjenu.

3. Tehnologije pohrane toplinske energije

Visoka gustoća pohrane energije i brzi odziv prilikom punjenja i pražnjenja željena su svojstva svakog sustava pohrane. Poznato je da postoje 3 oblika TES sustava: osjetni, latentni i termokemijski spremnici energije. [17]



Slika 4. Načini skladištenja topline [18]

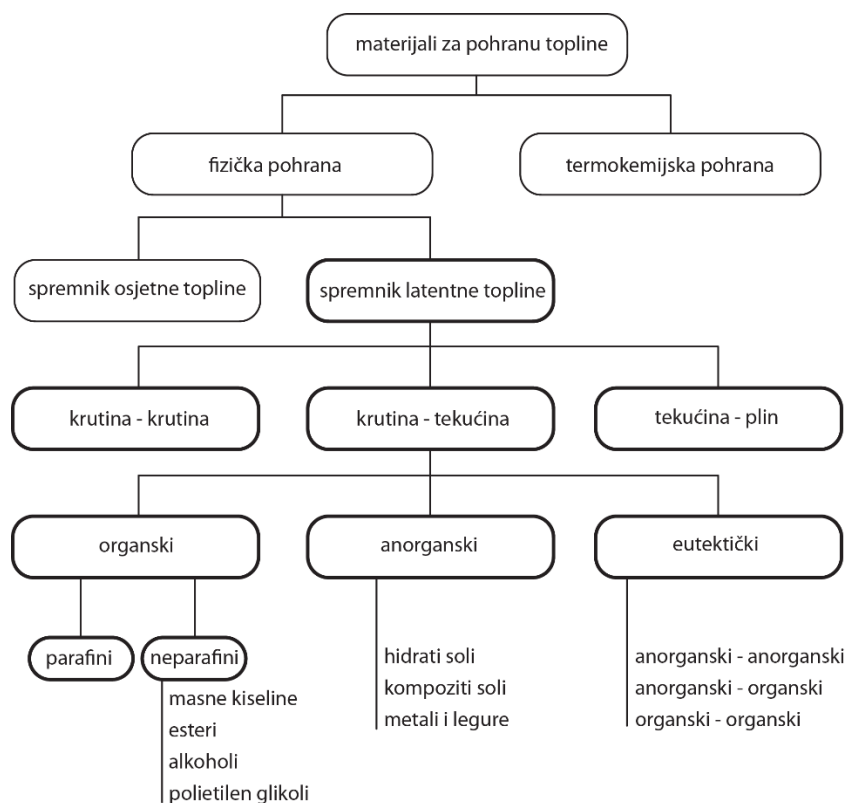
Pohrana u osjetnoj toplini najjednostavniji je oblik i postiže se nametanjem temperaturnog gradijenta mediju pohrane (tekućini ili krutini) u svrhu akumulacije ili otpuštanja topline, kao što je prikazano na a) dijelu slike 4. Zbog visoke rasprostranjenosti i velikog specifičnog toplinskog kapaciteta najčešći materijal za pohranu osjetne topline je voda ($c_{p_{voda}} = 4185 \text{ J/kgK}$ u usporedbi s $c_{p_{željezo}} = 452 \text{ J/kgK}$). Najčešće korišteni materijali u krutom stanju su cement, beton, mramor, granit, glina, pijesak i polimeri (PUR, PS, PVC). Tehnologija pohrane osjetne topline ima dvije glavne prednosti: jeftina je i u većini slučajeva korišteni materijali nisu toksični. Štoviše, materijal se u spremnicima nalazi u rasutom stanju, što olakšava dizajn sustava. U CSP postrojenjima medij za pohranu osjetne topline je najčešće u tekućem stanju, što olakšava konstrukciju izmjenjivača topline, ali se tijekom razdoblja niske insolacije ili stagnacije elektrane javlja problem održavanja medija u tekućem stanju. Navedena tehnologija ispoljava velike toplinske gubitke te potrebu za skupim materijalima cjevovoda i izolacije. Alternativno je moguće koristiti i dostupnije krute materijale poput betona, no i njega prate nedostaci kao što su veliki potrebni volumen i skupe izvedbe izmjenjivača topline. U tablici 2 nalaze se nekoliko najčešće korištenih medija u visoko-temperaturnim spremnicima osjetne topline i iznos pohranjene topline po jedinici mase za porast temperature od $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$. [8,11,18,19]

Tablica 2. Primjeri medija za pohranu osjetne topline [11]

Materijal	Gustoća (kg/m ³)	Pohranjena toplina (kJ/kg)	Pohranjena toplina (MJ/m ³)	Vrsta medija
Pijesak	1700	130	221	krutina
Ojačani beton	2200	85	187	krutina
Lijeivano željezo	7200	56	403	krutina
Natrijev klorid (NaCl)	2160	85	184	krutina
Lijevani čelik	7800	60	468	krutina
Silikatna opeka	1820	100	182	krutina
Opeka od magnezija	3000	115	345	krutina
Sintetičko ulje	900	230	207	tekućina
Nitritne soli	1825	150	274	tekućina
Tekući natrij	853	130	111	tekućina
Silikonsko ulje	900	210	189	tekućina
Litij	510	419	214	tekućina
Dowthem A	867	220	191	tekućina
Therminol 66	750	210	157	tekućina

Spremnike latentne topline (eng. latent heat thermal energy storage - LHTEs), u usporedbi sa spremnicima osjetne topline, karakterizira visoka gustoća pohranjene energije. U njima se energija, osim u osjetnom obliku, pohranjuje i kao energija fazne pretvorbe materijala, uglavnom iz krutog u tekuće stanje – zbog smanjenja volumetričkih troškova. Tijekom fazne pretvorbe, izmjena topline odvija se uz približno konstantnu temperaturu, što u specifičnim primjenama pogoduje stabilnosti sustava. Materijali s faznom pretvorbom krutina-tekućina mogu se, ovisno o njihovoj prirodi, svrstati organske, anorganske i njihove eutektičke mješavine, kao što je prikazano na slici 5. Svaki materijal ima svoje prednosti i nedostatke, a odabir adekvatnog materijala mora biti u skladu sa zahtjevima njihove primjene. Za primjenu materijala željene temperature tališta (odnosno krutišta ako se radi o postupku hlađenja) između 0 °C i 200 °C mogu se koristiti parafini, masne kiseline, polimeri, hidratne soli i šećerni

alkoholi. Viši iznosi tališta karakteristični su za soli i njihove eutektičke mješavine, visokoučinkovite polimere, metale i njihove legure. U tablici 3. navedeni su neki visokotemperaturni materijali s faznom pretvorbom i njihova svojstva. U zadnja dva stupca tablice nalazi se pohranjena toplina uslijed povišenja temperature za 100 °C. Kod parafina i masnih kiselina nema opasnosti od pothlađivanja, a karakterizira ih mala toplinska histereza (minimalna razlika između temperature fazne pretvorbe prilikom zagrijavanja i hlađenja) i stabilnost u odnosu na npr. hidratne soli, kod kojih može doći do pojave segregacije uslijed većeg broja ciklusa pretvorbe. Također, neke soli mogu biti kemijski agresivne prema konstrukcijskim materijalima spremnika. Nedostatak većine potencijalnih materijala za pohranu s faznom pretvorbom je niska toplinska provodnost. Za organske materijale ona iznosi između 0.15 i 0.3 W/(mK), dok je za hidratne soli između 0.4 i 0.7 W/(mK). [18,20,21,22]



Slika 5. Podjela materijala za pohranu latentne topline, prema [23]

Analiza dostupnih podataka o termo-fizikalnim svojstvima PCM-a pokazuje nedosljednost u vrijednostima istih. U nekim slučajevima, temperatura tališta određenog materijala može varirati za 10%, a ostala svojstva čak i do 50%. Postojanje takvih nedosljednosti ne može biti

opravdano samo razlikom u čistoći materijala, nego i uporabom posebnih metoda (koje nisu univerzalne) za određivanje svojstava [17].

Tablica 3. Primjeri medija za pohranu latentne topline [11]

Materijal	Talište (°C)	Gustoća (kg/m ³)	Latentna toplota taljenja (kJ/kg)	Pohranjena toplota (kJ/kg)	Pohranjena toplota (MJ/m ³)
NaNO ₃	310	2260	172	354	800
KNO ₃	330	2110	266	388	819
NaOH	318	2100	165	373	783
KOH	380	2044	150	297	607
MgCl/KCl/NaCl	380	1800	400	496	893
FeCl ₂	677	2800	266	336	941
KNO / 4.5% KCl	320	2100	150	271	569
60% MgCl ₂ / 20.4% KCl / 19.6% NaCl	380	1800	400	496	893
33% Na ₂ CO ₃ / 35% K ₂ CO ₃ / Li ₂ CO ₃	397	2300	277	442	1017
42.5% NaCl / 20.5% KCl / MgCl ₂	385–393	1800	410	510	918
78% Al / 12% Si	576	2700	560	710	1917

Termokemijski materijali pohranjuju i otpuštaju toplinu reverzibilnom endotermičkom/egzotermičkom reakcijom, kao što se vidi na slici 4c). Tijekom procesa punjenja, toplota predana materijalu A rezultira separacijom u dva dijela B + C. Produkti reakcije lako se razdvajaju i odvojeno skladište do potrebe za procesom pražnjenja. Tada se reaktanti B i C miješaju uz odgovarajuće uvjete/procesne parametre te se pri tom oslobađa energija. Iako je ova metoda energetski najučinkovitija, tek je u fazi razvoja i postoje bitne barijere koje još mora savladati, poput sporog procesa izmjene topline i mase te razvoja kompatibilnih materijala. Visoka gustoća pohranjene energije i nepostojanost toplinskih

dobitaka/gubitaka čini ovu metodu primjerenom za primjene sezonske pohrane. Tablica 4 prikazuje neke od materijala termokemijske pohrane, zajedno s pripadajućim reakcijama. [18]

Tablica 4. Materijali za termokemijsku pohranu i pripadajuće reakcije [11]

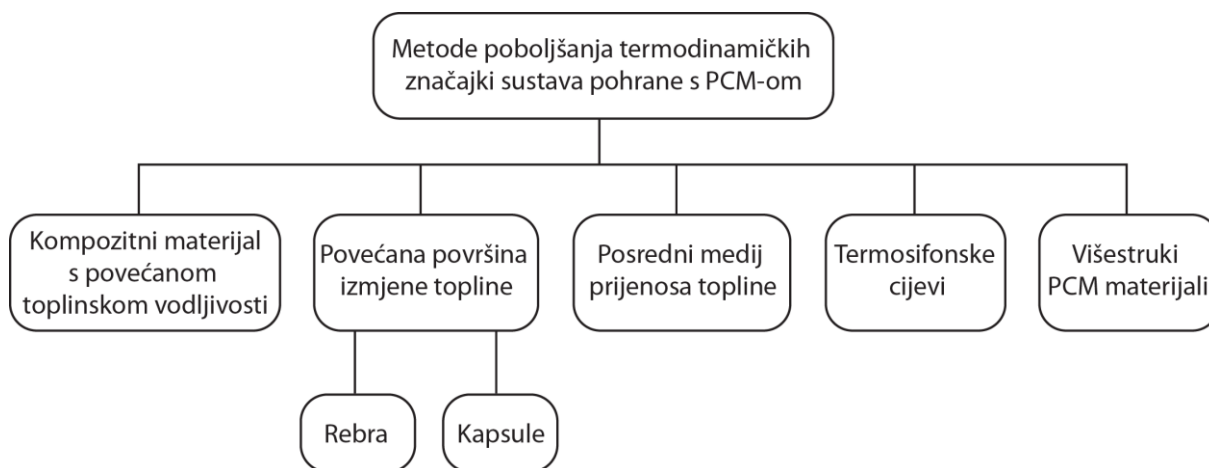
Temperatura (°C)	Reakcija	Gustoća pohranjene energije
530 (pri 1 bar)	$\text{MnO}_2 + \Delta H \leftrightarrow 0.5 \text{ Mn}_2\text{O}_3 + 0.25 \text{ O}_2$	42 kJ/mol
505 (pri 1 bar)	$\text{Ca(OH)}_2 + \Delta H \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	3 GJ/m ³
896 (pri 1 bar)	$\text{CaCO}_3 + \Delta H \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	4.4 GJ/m ³
250–500	$\text{MgH}_2 + \Delta H \leftrightarrow \text{Mg} + \text{H}_2$	75 kJ/mol
400–500	$\text{NH}_3 + \text{OH} \leftrightarrow 0.5 \text{ N}_2 + 1.5 \text{ H}_2$	67 kJ/mol
250–400	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Mg(OH)}_2$	3.3 GJ/m ³
180	$\text{FeCO}_3 \leftrightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$	2.6 GJ/m ³
200–300	$\text{metal } x\text{H}_2 \leftrightarrow \text{metal } y\text{H}_2 + (x - y)\text{H}_2$	4 GJ/m ³

Navedene i ukratko opisane metode pohrane toplinske energije imaju različite projekcije komercijalne popularnosti, sa spremnicima osjetne topline kao najzrelijom tehnologijom za CSP elektrane, iza čega slijedi LHTES, i termokemijska pohrana kao najmanje razvijena tehnologija. [8]

Primjena spremnika latentne topline ograničena je relativno niskom toplinskom provodnošću materijala za pohranu, što iziskuje osmišljavanje inovativnih konstrukcijskih rješenja, od kojih će neka biti prikazana u sljedećem poglavlju.

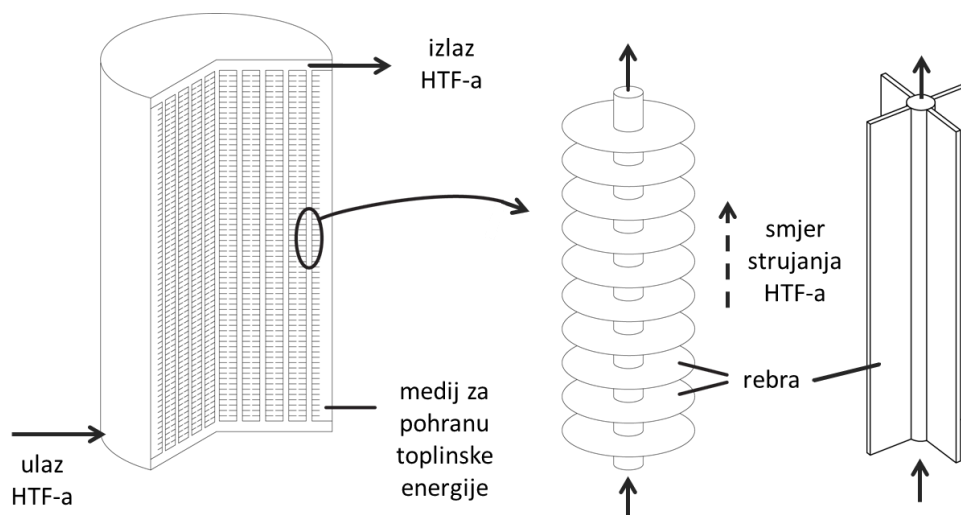
4. Metode poboljšanja performansi LHTES-a

Postoji mnogo načina poboljšanja prijenosa topline u između PCM-a i HTF-a, a mehanizmi kojima se te metode temelje su prikazani na slici 6.



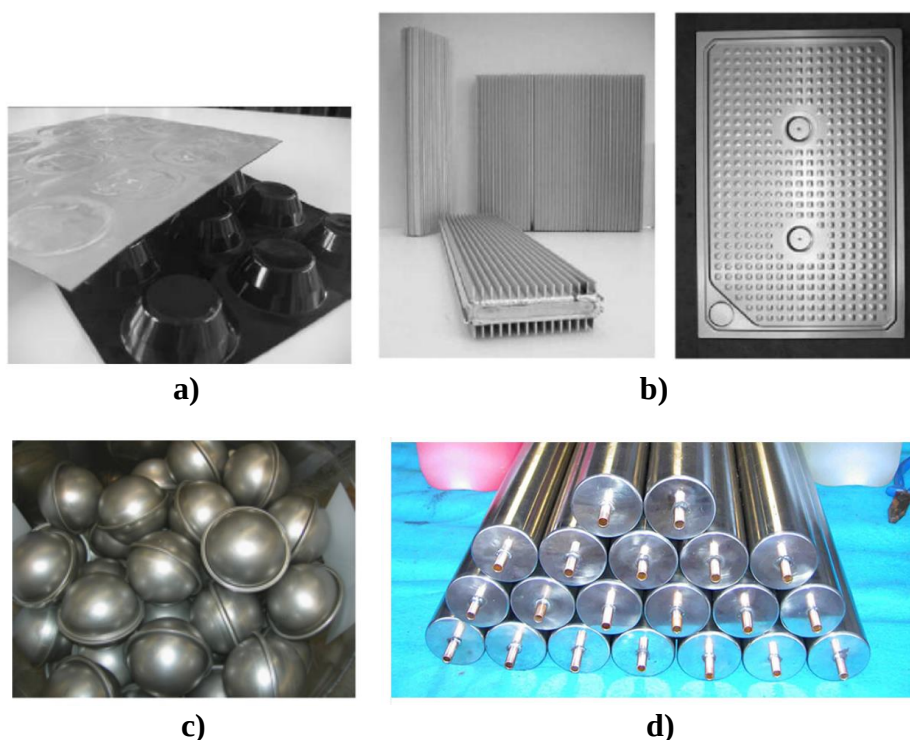
Slika 6. Mehanizmi poboljšanja performansi sustava pohrane s PCM-om [23]

Poboljšanje toplinske provodnosti unutar samog PCM-a moguće je uz pomoć metalnih struktura, impregniranih metalnih/keramičkih matrica, metalnih vlakana i pjena ili pak miješanjem PCM-a s grafitnim i drugim česticama. Poboljšanje prijenosa topline može se postići konceptom ugradnje većeg broja cijevi u spremnik u kojem se nalazi PCM. Kroz cijevi, kao i u klasičnom izmjenjivaču topline, protječe HTF i preko cijevne stijenke izmjenjuje toplinu s PCM-om. S vanjske se strane cijevi zavaruju ili mehanički pričvršćuju razni oblici rebara. Na slici 7. skicom su prikazana dva najčešće korištena oblika. Rebra, zbog visoke toplinske vodljivosti svojih materijala (čelik, aluminij, grafit), omogućuju bržu izmjenu topline s perifernim dijelovima PCM-a. Također je kroz stijenku glavnih cijevi moguće ugraditi termosifonske cijevi koje rade na principu gravitacije. Njih je moguće izvesti da rade pasivno u specifičnom rasponu temperatura i mogu biti proizvedene u raznim oblicima. [5,11,24]



Slika 7. Povećanje površine izmjene topline korištenjem cijevi s rebrima

Povećanje površine izmjene topline se, osim izvedbama s cijevima, postiže i punjenjem spremnika s kapsulama koje sadrže PCM. Kapsule su obično načinjene od materijala visoke toplinske vodljivosti i mogu biti raznih oblika i veličina (slika 8). Štoviše, tako zatvoreni PCM ne može reagirati s okolinom te promjene u volumenu medija pohrane nemaju utjecaja na ostatak spremnika. Mikro-enkapsulacija uključuje manje kapsule ($< 1 \text{ mm}$) i jeftin način izrade uranjanjem PCM-a u prekrivni materijal, dok makro-enkapsulacija uključuje veće kapsule i u većini slučajeva kompliciraniji način izrade. Tijekom rada sustava, punjenje spremnika odvija se tako da topli HTF ulazi na vrhu spremnika i potiskuje hladni prema dnu. Zbog takvog smjera strujanja, sile uzgona osiguravaju stabilnu termalnu stratifikaciju unutar spremnika (što se također naziva efekt termoklina). Štoviše, zbog guste raspodjele elemenata unutar spremnika, smanjena je i prirodna konvekcija između slojeva HTF-a. U ovakvim se sustavima uglavnom nalazi samo jedan spremnik, što smanjuje konstrukcijske troškove u usporedbi s npr. sustavom osjetne topline koji koristi dva spremnika. Kapsule se u spremnik može smjestiti kompaktno, rijetko ili bez posebnog poretka, ovisno o željenoj gustoći spremljene energije. [8,25,26]



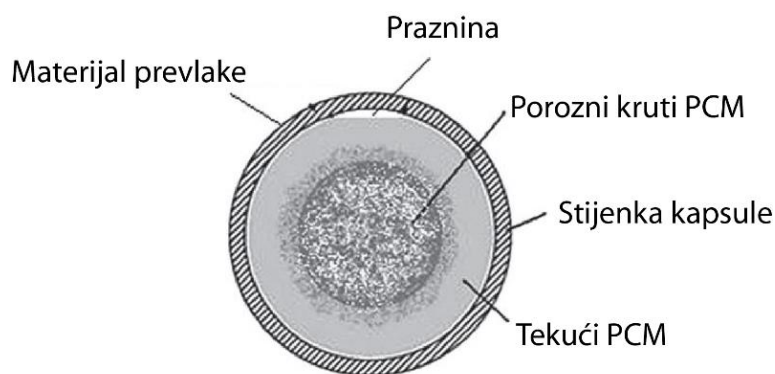
Slika 8. Neke od mogućih izvedbi kapsula s PCM-om: **a)** traka s kapsulama [27], **b)** orebreni aluminijski profili [27], **c)** sferične kapsule od nehrđajućeg čelika [17] i **d)** cilindrične kapsule [28]

Materijal PCM-a odabire se na temelju njegove temperature tališta, osjetnim i latentnim toplinskim kapacitetima, termalnoj i mehaničkoj stabilnosti, svojstvima cikličke degradacije, karakteristikama prijenosa topline i cijeni. Važno je precizno izmjeriti termofizikalna svojstva jer će o njima ovisiti količina spremljene topline i performanse cijelog sustava. Temperatura početka skrućivanja može minimalno varirati zbog pojave pothlađenosti PCM-a, što ograničava uporabu pojedinih materijala. Načini na koje se može ublažiti ili ukloniti pojava pothlađenosti su dodavanje sredstava za poticanje nukleacije, električka nukleacija i ultrazvučna iradijacija. [11,25]

Izbor materijala kapsule ovisi o uvjetima primjene; npr. radne temperature određuju koristi li se plastika ili metal. Dodatno, odabrani materijal mora biti u stanju podnijeti toplinska naprezanja i povišene tlakove, koji su posljedica toplinske ekspanzije PCM-a prilikom taljenja. Općenito, na koroziju se može djelovati korištenjem korozijski postojanih materijala, premazima i površinskom obradom te inhibitorima korozije. Zheng [29] je istražio kompatibilnost natrijevog nitrata (NaNO_3) i eutektičke mješavine natrijevog klorida i

magnezijevog klorida ($57\%\text{NaCl}-43\%\text{MgCl}_2$) s kapsulama raznih dimenzija i materijala (ugljični i nehrđajući čelik). Nakon 300-satnog cikličkog ispitivanja pri visokim temperaturama nije bilo znakova gubitka kvalitete i zaključeno je kako navedene kombinacije mogu biti korištene u visokotemperaturnim spremnicima topline. Omjer unutarnjeg i vanjskog promjera sferične kapsule također je bitan parametar. Niži omjer znači prekomjernu debljinu ljuske kapsule, što smanjuje količinu pohranjenog PCM-a, dok visoki omjer može dovesti do nedovoljne čvrstoće, što povećava šanse za izljevom PCM-a. [25,30,31]

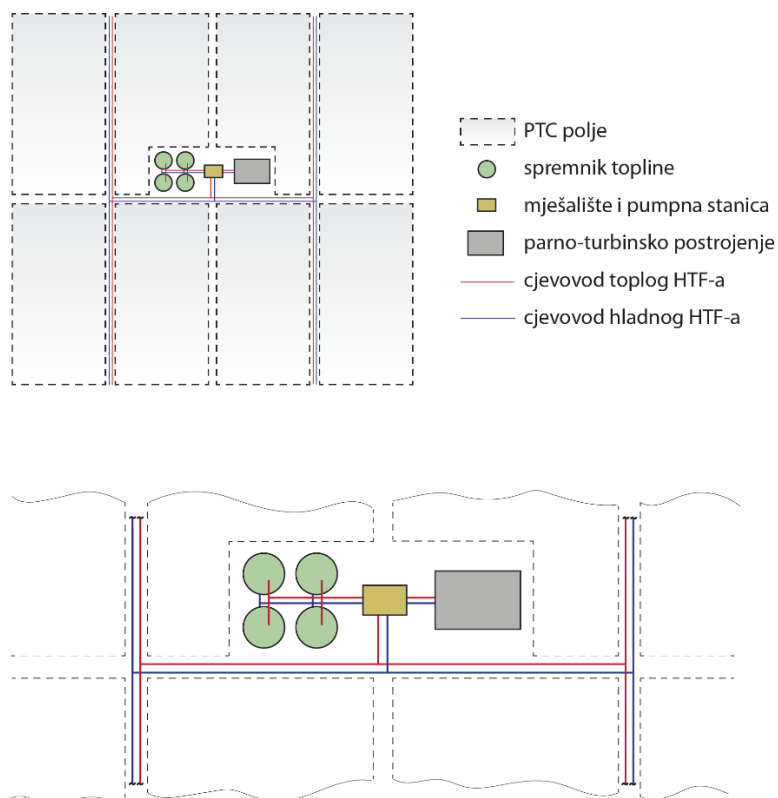
Najveća prepreka pri izradi sferičnih kapsula je osiguravanje željenog volumena zrakom ispunjenog prostora, koji mora postojati kako bi se PCM mogao slobodno širiti prilikom taljenja. Bez slobodnog prostora kapsule su sklone pucanju. Postoje dva glavna načina makroenkapsulacije PCM-a: nanošenje prevlake preko kuglice ili punjenje prethodno napravljene ljuske sa željenom količinom PCM-a. Kod tehnike s premazom, koja je prikazana na slici 9, početne kuglice su porozne. Prilikom prvog procesa taljenja materijal popunjava sve pore te nakon ponovnog hlađenja pri vrhu kapsule ostaje spomenuti potrebni prostor. Kod izrade kuglica potrebno je uvjeriti se da postignuta poroznost osigurava dovoljnu količinu zraka za ekspanziju. [11,30]



Slika 9. Proces popunjavanja pora tijekom fazne pretvorbe PCM-a [11]

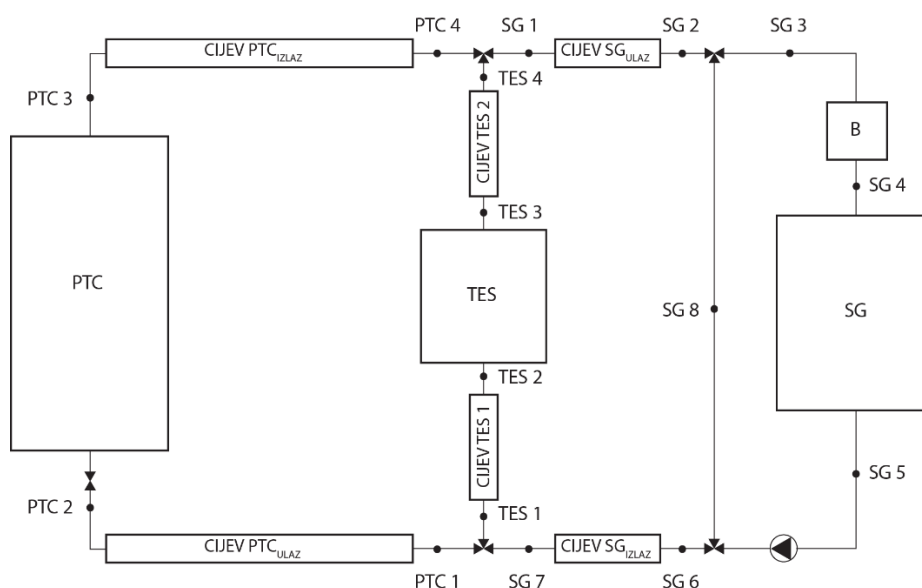
5. Matematički model

Postrojenje nazivne snage 50 MW modelirano je navodeći se parametrima i slikovnim prikazima solarne elektrane Andasol 1, Granada, Španjolska [32,33,34]. Jedina bitna razlika je način skladištenja toplinske energije. Andasol 1 ima indirektan sustav s dva spremnika rastaljene mješavine 60% natrijevog nitrata i 40% kalijevog nitrata ($60\%\text{NaNO}_3\text{-}40\%\text{KNO}_3$), a toplina se između HTF-a i soli prenosi putem izmjenjivača topline. U ovome je radu korišten spremnik popunjen kapsulama, u kojima se nalazi materijal fazne promjene. U ostatku spremnika (34% volumena) smješten je HTF (sintetičko ulje Dowtherm A). Prednosti korištenja PCM-a dane su u prethodnim poglavljima, a u nastavku će se, pomoću simulacija, navedene prednosti pokušati i potvrditi. Zbog mogućeg preopterećenja kapsula pri dnu spremnika i pretpostavljenog velikog pada tlaka HTF-a tijekom strujanja kroz spremnik, odlučeno je sustav izvesti s 4 paralelna manja spremnika. Ilustrativni tlocrt elektrane, s naznakom bitnijih komponenti, dan je na slici 10. Polje paraboličkih zrcala prekriva ukupno $510,120\text{ m}^2$, a sastoji se od 156 paralelnih kolektorskih jedinica s po 48 serijski spojena Skala-ET kolektora (svaki duljine 12 m i širine 6 m). Duž PTC polja paralelno se protežu 4 topla i 4 hladna cjevovoda.



Slika 10. Ilustracija tlocrta modelirane elektrane (gore) i središnji detalj (dolje)

Shema CSP postrojenja prikazana je na slici 11, a projektni parametri generatora pare pri nazivnoj snazi navedeni su u tablici 5. Osim kolektorskog polja (dalje PTC), spremnika latentne topline (dalje TES) i parno-turbinskog dijela (dalje SG)¹ te pripadajućih cjevovoda, dodan je i pomoćni grijač (na slici 11 – B – engl. boiler) maksimalne snage 30 MW prikazan na slici 11 s oznakom B (engl. boiler). Zbog velikih duljina cjevovoda, a time i unošenja određene tromosti u sustav, također su modelirane i cijevi PTC_{ulaz}, PTC_{izlaz}, SG_{ulaz}, SG_{izlaz}, TES_{ulaz} i TES_{izlaz}. Uloga povratnog voda oko SG-a služi za forsiranje početka proizvodnje el. energije, što će biti objašnjeno kasnije.



Slika 11. Shema modelirane elektrane

Tablica 5. Vrijednosti projektnih parametara generatora pare

Ulazna temperatura HTF-a	393 °C
Maseni protok HTF-a	593 kg/s
Ulazna temperatura HTF-a	293 °C

¹ Zbog praktičnosti će se u nastavku rada kratica SG (eng. steam generator – hrv. generator pare) odnositi na cijelo parno-turbinsko postrojenje.

5.1. Kolektorsko polje, parno-turbinsko postrojenje i cjevovodi

Slika 12 prikazuje regulacijsku shemu PTC polja. Uloga PID regulatora je, promjenom protoka tijekom dana, održavati temperaturu na izlazu iz PTC-a $\vartheta_{\text{PTC,izlaz}}$ na željenoj vrijednosti (ulazna temperatura u SG). Profili direktnog sunčevog zračenja korištenih u ovome radu predstavljaju prosječne mjesečne vrijednosti referentnog mjeseca, za mjesto Granada, Španjolska [35].

Ulje u kolektorskoj jedinici promatra se kao sustav mase M_{PTC} , u koji ulazi toplinski tok nošen uljem temperature $\vartheta_{\text{PTC,ulaz}}$ i iz kojeg izlazi toplinski tok nošen uljem temperature $\vartheta_{\text{PTC,izlaz}}$. Toplinski dobitak je sunčevo zračenje, a gubici se određuju na temelju srednje temperature u jedinici i dani su u specifikacijama proizvođača absorberskih cijevi². Prijenosnom funkcijom opisuje se toplinska tromost absorbera, a u konstantu K_1 ulazi utjecaj reflektivnosti zrcala (94.5%), emisivnosti absorbera (97%), udjela spojnice (2.9% absorberske cijevi) i površine kolektorskog polja jedne jedinice.

Temperatura na izlazu se računa iz energijske bilance ulaznih i izlaznih toplinskih tokova.

$$\frac{dE_{\text{PTC}}}{dt} = e_{\text{ulaz}} - e_{\text{izlaz}}, \quad (5.1)$$

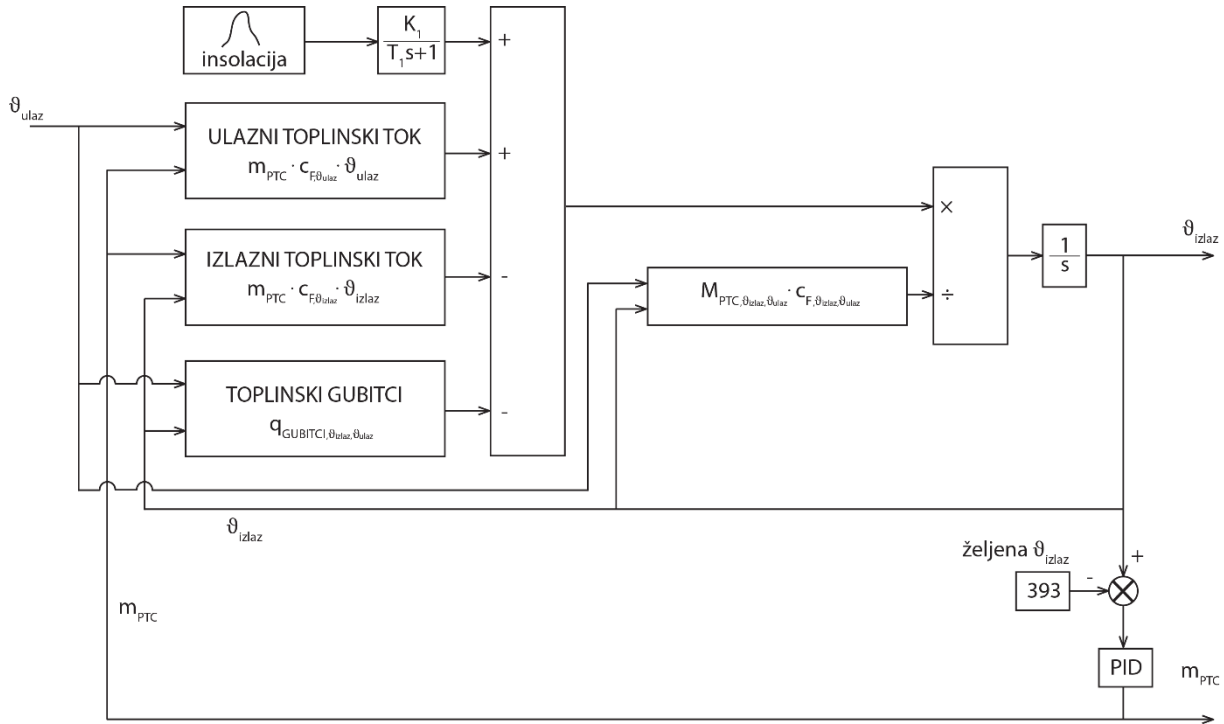
što se dalje raspisuje kao:

$$M_{\text{PTC}} \cdot c_F \cdot \frac{d\vartheta_{\text{PTC,izlaz}}}{dt} = q_{\text{sunce}} + q_{\text{PTC,ulaz}} - q_{\text{PTC,izlaz}} - q_{\text{PTC,gubici}}, \quad (5.2)$$

gdje je

$$M_{\text{PTC}} = \rho_{\text{PTC}} \cdot \frac{D_{\text{absorber,u}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{\text{PTC}} \text{ [kg]} - \text{masa ulja u jednoj jedinici.}$$

² Dijagrami temperaturne ovisnosti specifičnih gubitaka u PTC-u, kao i svojstava HTF-a (gustoća, specifični toplinski kapacitet, toplinska provodnost, dinamička viskoznost) nalaze se u Prilogu rada.



Slika 12. Model kolektorskog polja

Srednja temperatura potrebna za izračun gubitaka, gustoće ulja ρ_{PTC} i specifičnog toplinskog kapaciteta c_F dobiva se na sljedeći način:

$$\vartheta_{PTC,srednje} = 0.5 \cdot (\vartheta_{PTC,ulaz}^* + \vartheta_{PTC,izlaz}), \quad (5.3)$$

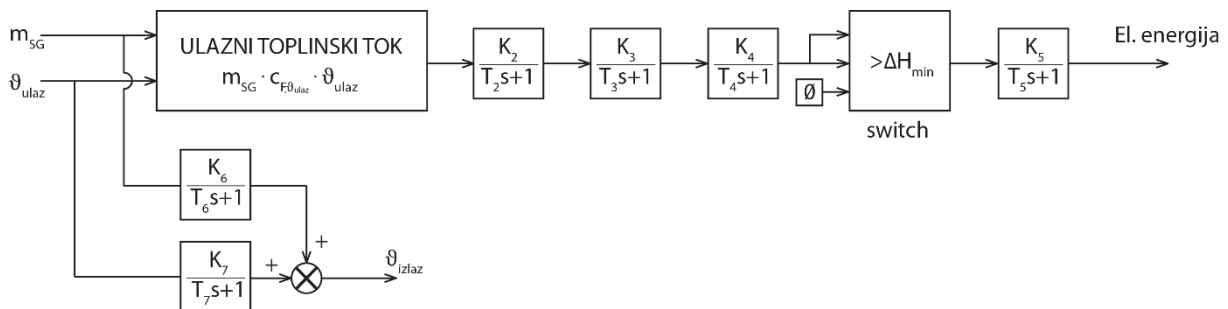
gdje je

$$\vartheta_{PTC,ulaz}^* = \begin{cases} \vartheta_{PTC,ulaz} & \text{za } m_{PTC} > 0 \\ K_{PTC,proj} \cdot \vartheta_{PTC,izlaz} & \text{za } m_{PTC} = 0. \end{cases} \quad (5.4)$$

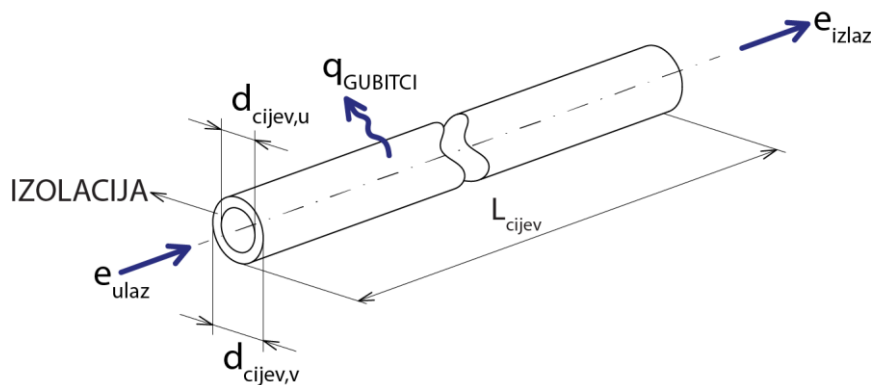
Prethodna je jednadžba potrebna iz razloga što se temperatura $\vartheta_{PTC,ulaz}$ mjeri netom prije ulaska u PTC (u izoliranom dovodnom cjevovodu). Ne znajući stvarnu temperaturu nakon samog ulaska u PTC tijekom mirovanja, ona se pretpostavlja na $K_{PTC,proj} \cdot \vartheta_{PTC,izlaz}$, gdje je konstanta $K_{PTC,proj}$ dobivena iz omjera projektnih temperatura:

$$K_{PTC,proj} = \frac{\vartheta_{PTC,izlaz}}{\vartheta_{PTC,ulaz}} = \frac{\vartheta_{SG,ulaz}}{\vartheta_{SG,izlaz}} = \frac{393}{293} = 0.746 \quad (5.5)$$

Model SG-a napravljen je vrlo jednostavno kao što je prikazano na slici 13. Temperatura ulja na izlazu $\vartheta_{SG,izlaz}$ se određuje direktno kao funkcija masenog protoka m_{SG} i temperature ulaznog ulja $\vartheta_{SG,ulaz}$ korištenjem prijenosnih funkcija. Generirana el. energija dobiva se iz ulaznog toplinskog toka ulja u SG, također preko niza prijenosnih funkcija, koje ovdje opisuju utjecaj tromosti sustava i akumulaciju energije u komponentama postrojenja. Blok „switch“ služi za određivanje trenutka sinkronizacije turbine na električnu mrežu, što se događa onda kada je generator pare sposoban osigurati dovoljnu količinu pare visokih parametara.



Slika 13. Pojednostavljeni model parno-turbinskog postrojenja



Slika 14. Toplinski tokovi u modelu cjevovoda

Toplinski tokovi koji se odnose na jednu cijev prikazani su na slici 14, a dimenzije su navedene u tablici 6. Vremenska promjena temperature ulja u referentnoj cijevi računa se kao:

$$\begin{aligned}
 & M_{F,cijev} \cdot c_{F,\vartheta_{cijev,izlaz}} \cdot \frac{d\vartheta_{F,cijev,izlaz}}{dt} \\
 &= m_{cijev} \cdot c_{F,\vartheta_{cijev,ulaz}} \cdot \vartheta_{F,cijev,ulaz} - m_{cijev} \cdot c_{F,\vartheta_{cijev,izlaz}} \cdot \vartheta_{F,cijev,izlaz} \\
 &\quad - q_{cijev,gubici}
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

gdje su:

$$M_{F, \text{cijev}} = \rho_{F, \text{cijev, izlaz}} \cdot \frac{D_{\text{cijev, u}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot L_{\text{cijev}} \text{ [kg]} - \text{masa ulja (fluida) u cijevi,}$$

$$q_{\text{cijev, gubici}} = k_{\text{cijev, gubici}} \cdot (\vartheta_{F, \text{cijev, izlaz}} - \vartheta_{\text{ok}}) \text{ [W]} - \text{gubici prema okolišu,}$$

$\vartheta_{\text{ok}} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ – temperatura okoliša, a ukupni koef. prijenosa topline prema okolišu:

$$k_{\text{cijev, gubici}} = \left(\frac{1}{k_{\text{konv, ulje-cijev}}} + \frac{1}{k_{\text{kond, cijev}}} + \frac{1}{k_{\text{kond, izolacija}}} + \frac{1}{k_{\text{kond, plašt}}} + \frac{1}{k_{\text{konv, plašt-zrak}}} \right)^{-1}. \quad (5.7)$$

Pojedini koeficijenti prijelaza topline su navedeni u nastavku. $r_{\text{cijev, u}}$ označava unutarnji polumjer cijevi, a $r_{\text{cijev, v}}$ vanjski polumjer plašta (polumjer površine koja je u kontaktu s okolnim zrakom). δ_{cijev} je debljina stijenke cijevi, a $\delta_{\text{plašt}}$ debljina stijenke plašta. Između cijevi i plašta nalazi se kamena vuna, koja služi kao toplinska izolacija.

$$k_{\text{konv, ulje-cijev}} = \alpha_{\text{cijev, u}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{cijev, u}} \cdot L_{\text{cijev}} \quad (5.8)$$

$$k_{\text{kond, cijev}} = \frac{2\pi \cdot r_{\text{cijev, u}} \cdot L_{\text{cijev}} \cdot \lambda_{\text{cijev}}}{\ln \frac{r_{\text{cijev, u}} + \delta_{\text{cijev}}}{r_{\text{cijev, u}}}} \quad (5.9)$$

$$k_{\text{kond, izolacija}} = \frac{2\pi \cdot (r_{\text{cijev, u}} + \delta_{\text{cijev}}) \cdot L_{\text{cijev}} \cdot \lambda_{\text{izolacija}}}{\ln \frac{r_{\text{cijev, v}} - \delta_{\text{plašt}}}{r_{\text{cijev, u}} + \delta_{\text{cijev}}}} \quad (5.10)$$

$$k_{\text{kond, plašt}} = \frac{2\pi \cdot (r_{\text{cijev, v}} - \delta_{\text{plašt}}) \cdot L_{\text{cijev}} \cdot \lambda_{\text{plašt}}}{\ln \frac{r_{\text{cijev, v}}}{r_{\text{cijev, v}} - \delta_{\text{plašt}}}} \quad (5.11)$$

$$k_{\text{konv, plašt-zrak}} = \alpha_{\text{cijev, v}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{cijev, v}} \cdot L_{\text{cijev}} \quad (5.12)$$

Uvodi se pojednostavljenje u kojem se zanemaruju debljine cijevi i plašta ($\delta_{\text{cijev}} = \delta_{\text{plašt}} = 0$) te je tada konačan oblik jednadžbe (5.7):

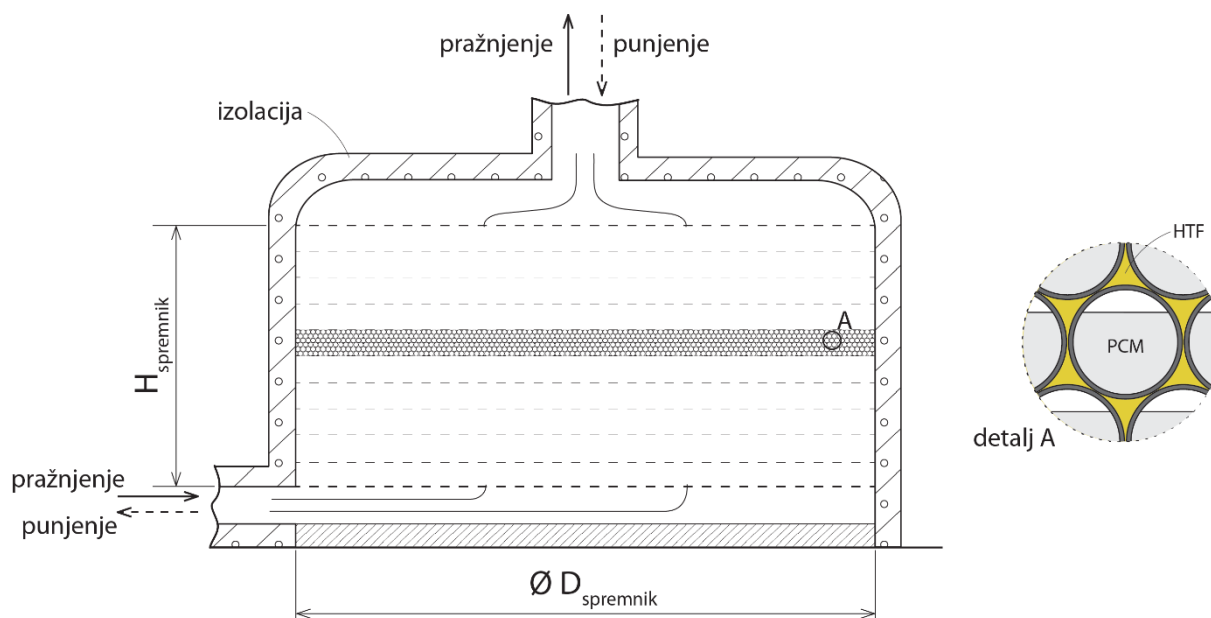
$$k_{\text{cijev,gubici}} = \frac{L_{\text{cijev}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{cijev,u}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{cijev,u}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{izolacija}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{cijev,u}}} \cdot \ln \frac{r_{\text{cijev,v}}}{r_{\text{cijev,u}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{cijev,v}} \cdot 2\pi \cdot r_{\text{cijev,v}}}} \quad (5.13)$$

Tablica 6. Dimenzije cjevovoda

$L_{\text{PTC}_{\text{ulaz}}}, L_{\text{PTC}_{\text{izlaz}}}$	800 m
$L_{\text{SG}_{\text{ulaz}}}, L_{\text{SG}_{\text{izlaz}}}, L_{\text{TES}_{\text{ulaz}}}, L_{\text{TES}_{\text{izlaz}}}$	50 m
$r_{\text{PTC}_{\text{ulaz,u}}}, r_{\text{PTC}_{\text{izlaz,u}}}$	15 cm
$r_{\text{PTC}_{\text{ulaz,v}}}, r_{\text{PTC}_{\text{izlaz,v}}}$	30 cm
$r_{\text{SG}_{\text{ulaz,u}}}, r_{\text{SG}_{\text{izlaz,u}}}, r_{\text{TES}_{\text{ulaz,u}}}, r_{\text{TES}_{\text{izlaz,u}}}$	50 cm
$r_{\text{SG}_{\text{ulaz,v}}}, r_{\text{SG}_{\text{izlaz,v}}}, r_{\text{TES}_{\text{ulaz,v}}}, r_{\text{TES}_{\text{izlaz,v}}}$	70 cm

5.2. Spremnik latentne topline

Pošto spremnici rade u paralelnom režimu, model dinamike procesa provodi se samo za jedan spremnik, kroz koji u svakom trenutku prolazi jedna četvrtina nametnutog protoka prema TES sustavu. Svaki od četiri spremnika je zbog uvida u temperaturnu stratifikaciju podijeljen na 10 zamišljenih slojeva ispunjenih kapsulama, što je prikazano na slici 15. Između kapsula se nalazi HTF, koji tijekom punjenja struji prema dolje, a tijekom pražnjenja prema gore (obrnuto od smjera gravitacije). Kapsule su zbog širenja soli tijekom fazne pretvorbe djelomično ispunjene zrakom (20% volumena u krutom stanju). Najveći volumni udio savršeno sferičnih kapsula koji se može smjestiti u trodimenzionalni euklidski prostor iznosi 74.05% [36]. U praksi, taj udio ovisi o načinu na koji su kapsule posložene, a u literaturi se predlažu ili su korištene vrijednosti od 63% do 68% [9,37,38,39] te je za potrebe ovog rada odabrana vrijednost 66%. Spremnik je obavijen izolacijom, koja će se u ovome radu smatrati idealnom, odnosno toplinski gubici prema okolišu biti će zanemareni. Dimenzije $\varnothing D_{\text{spremnik}}$ i H_{spremnik} , spominjane u nastavku rada su unutarnje dimenzije spremnika, odnosno prostora u kojemu se nalaze kapsule.



Slika 15. Skica poprečnog presjeka spremnika (lijevo) i kapsule (desno)

Energetska jednadžba ulja u sloju je:

$$M_{sl,i} \cdot c_{F,sl,i} \cdot \frac{d\vartheta_{sl,i}}{dt} = q_{HTF,ulaz} - q_{HTF,izlaz} - q_{HTF-kapsule} \quad (5.14)$$

Ulazni i izlazni toplinski tok te izmjena topline HTF-a s kapsulama su:

$$q_{HTF,ulaz,i} = m_{TES} \cdot c_{F,sl,i+sm} \cdot \vartheta_{sl,i+sm}, \quad (5.15)$$

$$q_{HTF,izlaz,i} = m_{TES} \cdot c_{F,sl,i} \cdot \vartheta_{sl,i}, \quad (5.16)$$

$$q_{HTF-kapsule} = A_v \cdot n_{k,sl} \cdot \alpha_{sl,v} \cdot (\vartheta_{sl,i} - \vartheta_{stjenka,i}), \quad (5.17)$$

Indeks i označava redni broj sloja u spremniku počevši odozgora, a sm označava smjer kretanja ulja ($sm = 1$ za punjenje i $sm = -1$ za pražnjenje). m_{TES} ovdje predstavlja maseni protok ulja kroz jedan spremnik. Masa i volumen ulja u i -tom sloju su:

$$M_{sl,i} = \rho_{sl,i} \cdot V_{sl,i}, \quad (5.18)$$

$$V_{sl,i} = \frac{D_{spremnik}^2 \cdot \pi \cdot H_{spremnik} \cdot \varepsilon}{4 \cdot n_{slojeva}}. \quad (5.19)$$

Ukupno oplošje i broj kapsula u sloju:

$$A_{v,uk} = n_{k,sl} \cdot 4 \cdot r_{k,v}^2 \cdot \pi, \quad (5.20)$$

$$n_{k,sl} = \frac{D_{spremnik}^2 \cdot \pi \cdot (1 - \varepsilon)}{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot r_{k,v}^3 \cdot \pi}. \quad (5.21)$$

Koeficijent prijelaza topline sa ulja na stijenku kapsule napravljene od nehrđajućeg čelika se računa prema Nellis [37]:

$$\alpha_{sl,v} = j_H \cdot \text{Pr}^{-\frac{2}{3}} \cdot G \cdot c_F, \quad (5.22)$$

gdje Colburnov faktor j_H ovisi o Reynoldsovom broju te se prema korelaciji iz [9] može aproksimirati kao:

$$j_H = 0.191 \cdot \text{Re}^{-0.278} \quad (5.23)$$

Reynoldsov broj i ostali članovi u jednadžbi (5.14) se računaju na slijedeći način.

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot G \cdot r_{\text{kar}}}{4 \cdot \mu_F} \quad (5.24)$$

$$G = \frac{m_{\text{TES}}}{\varepsilon \cdot \frac{D_{\text{spremnik}}^2 \cdot \pi}{4}} \quad (5.25)$$

$$r_{\text{kar}} = \frac{\varepsilon \cdot d_k}{4 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (5.26)$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu_F \cdot c_F}{\lambda_F} \quad (5.27)$$

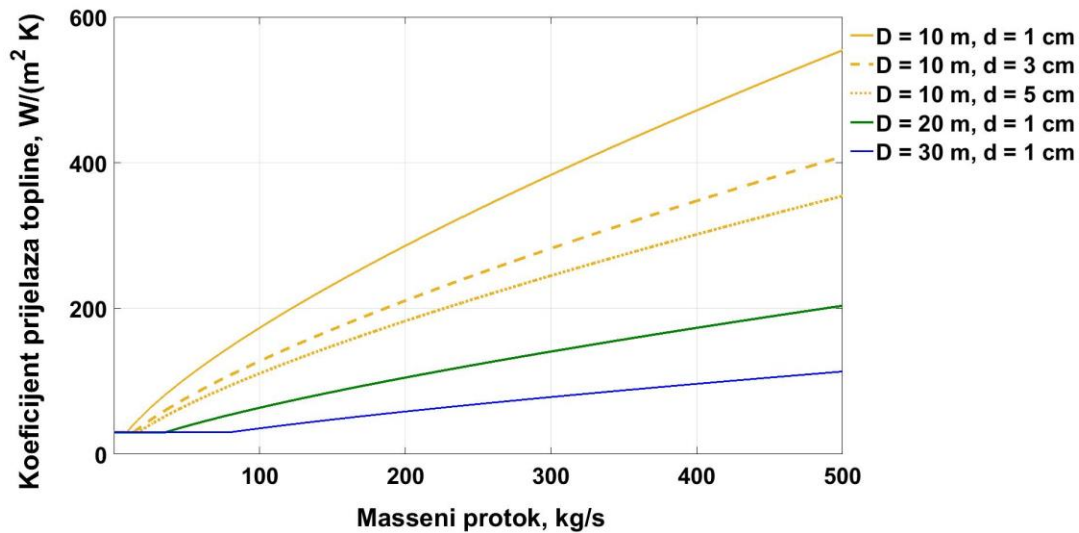
Uvrštavanjem jednadžbi (5.15-5.19) u jednadžbu (5.14) te izlučivanjem konstantnih vrijedosti dobiva se konačni oblik, koji direktno govori o utjecaju konstrukcijskih parametara spremnika na $\alpha_{\text{sl,v}}$.

$$\alpha_{\text{sl,v}} = K_{\alpha_{\text{sl,v}}} \cdot \frac{c_F^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda_F^{\frac{2}{3}} \cdot (m_{\text{TES}})^{0.722}}{\mu_F^{0.3887}}, \quad (5.28)$$

gdje je:

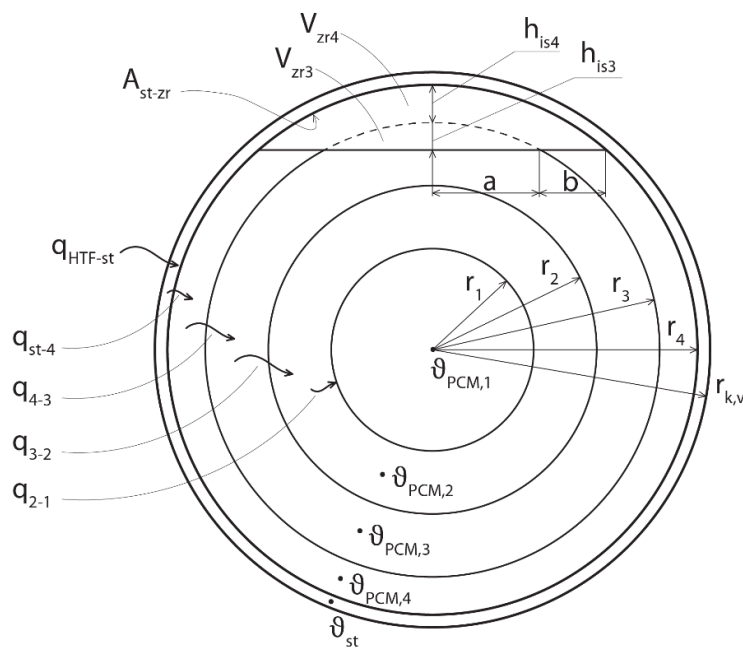
$$K_{\alpha_{\text{sl,v}}} = \frac{0.227394 \cdot (1 - \varepsilon)^{0.278}}{\varepsilon \cdot D_{\text{spremnik}}^{1.444} \cdot d_k^{0.278}}. \quad (5.29)$$

Već se iz prethodne jednadžbe može zaključiti da prilikom dimenzioniranja spremnika treba težiti manjoj poroznosti ε (volumni udio ulja u spremniku) te manjem promjeru spremnika D_{spremnik} i kapsula d_k . Pošto jednadžba (5.22) vrijedi samo za prisilnu konvekciju, potrebno je odrediti i iznos $\alpha_{\text{sl,v}}$ za slučaj malih Reynoldsovih brojeva, odnosno mirovanje fluida. Ovdje se ta vrijednost pretpostavlja na 30 W/(m²K). Na slici 16 je prikazana ovisnost koeficijenta $\alpha_{\text{sl,v}}$ o masenom protoku, za razne promjere spremnika i kapsula.



Slika 16. Ovisnost koeficijenta prijelaza topline o masenom protoku, za razne promjere spremnika D i kapsula d

Prije nego što se krene u raspisivanje jednadžbi koje opisuju prijenos topline u samoj kapsuli, potrebno je izvesti njene geometrijske relacije. Slika 17 prikazuje diskretizacijsku shemu kapsule. Unutrašnjost je podijeljena u 5 dijelova: 4 sloja PCM-a i prostor ispunjen zrakom. Tijekom rada spremnika dolazit će do temperaturom prouzročenih promjena gustoće materijala pohrane, a time i njegove volumne ekspanzije. Jednadžbe koje opisuju promjenu volumena dane su u nastavku.



Slika 17. Diskretizacija kapsule

Vertikalna razlika između unutrašnjosti kapsule i slobodne površine PCM-a, odnosno visina kuglinog isječka je

$$h_{is} = h_{is3} + h_{is4}, \quad (5.30)$$

a h_{is3} se može izraziti kao

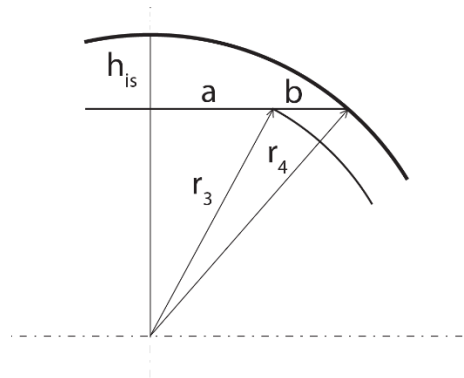
$$h_{is3} = r_4 - h_{is4}. \quad (5.31)$$

Radijus površine izmjene topline između zraka i 3. sloja te debljina kružnog vijenca između zraka i 4. sloja su

$$a = \sqrt{r_3^2 - (r_4 - h_{is})^2}, \quad (5.32)$$

$$b = \sqrt{r_4^2 - (r_4 - h_{is})^2} - a, \quad (5.33)$$

a dobivaju se korištenjem Pitagorinog poučka (slika 18).



Slika 18. Detalj kapsule uz prikaz karakterističnih trokuta

Tada su spomenute površine:

$$A_{zr-3} = a^2 \pi = [r_3^2 - (r_4 - h_{is})^2] \cdot \pi, \quad (5.34)$$

$$A_{zr-4} = [(a + b)^2 - a^2] \cdot \pi = (r_4^2 - r_3^2) \cdot \pi = \text{const.} \quad (5.35)$$

Površina između zraka i stjenke je

$$A_{st-zr} = 2 \cdot r_4 \cdot \pi \cdot h_{is}, \quad (5.36)$$

a volumen zraka je

$$V_{zr} = \frac{\pi h_{is}^2}{3} \cdot (3 \cdot r_4 - h_{is}). \quad (5.37)$$

Volumen zraka koji se nalazi u prostoru kojeg čini zamišljeni nastavak 3. sloja:

$$V_{zr3} = \frac{\pi \cdot h_3^2}{3} \cdot (3 \cdot r_3 - h_3). \quad (5.38)$$

Omjer volumena 3. sloja s prazninom i bez nje, što će biti potrebno za računanje provođenja topline je

$$V_{omjer3} = 1 - \frac{V_{zr3}}{\frac{4}{3}(r_3^3 - r_2^3) \cdot \pi} \quad (5.39)$$

te isto za 4. sloj:

$$V_{omjer4} = 1 - \frac{V_{zr} - V_{zr3}}{\frac{4}{3}(r_4^3 - r_3^3) \cdot \pi}. \quad (5.40)$$

Visina h_{is} se dobiva izjednačavanjem jednadžbe (5.37) i sljedećeg izraza:

$$V_{zr}^* = V_{k,u} - V_{PCM} = \frac{4}{3} r_4^3 \pi - \frac{M_{PCM,ukupno}}{\bar{\rho}_{PCM}}, \quad (5.41)$$

gdje je $M_{PCM,ukupno} = \text{const.}$ ukupna masa i $\bar{\rho}_{PCM}$ srednja gustoća PCM-a u kapsuli i računa se na temelju masenih udjela, što će biti objašnjeno kasnije. Krajnja kubna jednadžba za izračun visine h_{is} je tada

$$h_{is}^3 - 3 \cdot r_4 \cdot h_{is}^2 + 4 \cdot r_4^3 - \frac{M_{PCM,ukupno}}{\bar{\rho}_{PCM}} = 0. \quad (5.42)$$

Za definiranje srednje gustoće potreban je udio krute faze PCM-a:

$$x = \frac{h_{talj,kraj} - h}{L_{PCM}}, \quad 0 < x < 1 \quad (5.42)$$

gdje su h specifična entalpija, L_{PCM} latentna toplina taljenja i specifična entalpija na kraju taljenja je:

$$h_{\text{talj,kraj}} = c_{\text{PCM}} \cdot \vartheta_{\text{talj}} + L_{\text{PCM}}. \quad (5.43)$$

Srednji udio krute faze i srednja temperatura PCM-a u kapsuli i-tog sloja spremnika su

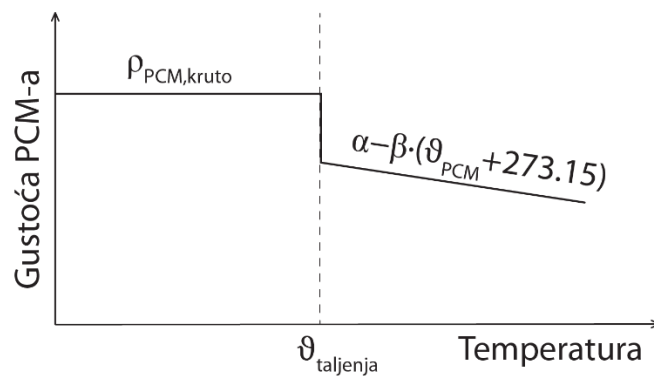
$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^4 x_{i,j} \cdot M_{\text{PCM},i,j}}{\sum_{j=1}^4 M_{\text{PCM},i,j}}, \quad (5.44)$$

$$\bar{\vartheta}_{\text{PCM},i} = \frac{\sum_{j=1}^4 \vartheta_{\text{PCM},i,j} \cdot M_{\text{PCM},i,j}}{\sum_{j=1}^4 M_{\text{PCM},i,j}}. \quad (5.45)$$

Pretpostavka je da je gustoća u krutom stanju konstanta, tijekom fazne se pretvorbe spušta na određenu vrijednost i dalje linearno opada (slika 19):

$$\bar{\rho}_{\text{PCM},i} = \bar{x}_i \cdot \rho_{\text{PCM,kruto}} + (1 - \bar{x}_i) \cdot [\alpha - \beta \cdot (\bar{\vartheta}_{\text{PCM},i} + 273.15)], \quad (5.46)$$

gdje su α i β koeficijenti za računanje gustoće u tekućem stanju.



Slika 19. Metoda određivanja gustoće PCM-a

Proces se izmjene topline unutar PCM-a pojednostavljuje zanemarivanjem konvekcije i uvođenjem efektivne toplinske provodnosti, λ_{eff} , pa tada ukupna topl. provodnost ovisi o udjelu krute faze referentnog sloja PCM-a:

$$\lambda_{i,j} = \lambda_{\text{PCM,kruto}} \cdot x_{i,j} + \lambda_{\text{eff},i,j} \cdot (1 - x_{i,4}), \quad (5.47)$$

gdje je

$$\lambda_{\text{eff},i,j} = 4 \cdot \lambda_{\text{PCM,kruto}}. \quad (5.48)$$

Sada se može krenuti na opisivanje termodinamičkih procesa unutar kapsule. Energetska jednažba stijenke kapsule je

$$M_{\text{st},i} \cdot c_{\text{st},i} \cdot \frac{d\vartheta_{\text{st},i}}{dt} = \frac{q_{\text{HTF-kapsule}}}{n_{\text{k,sl}}} - q_{\text{konv,st-zr}} - q_{\text{kond,st-4}} - q_{\text{konv,st-4}}, \quad (5.49)$$

gdje je konvektivni prijenos topline između stijenke i zraka

$$q_{\text{konv,st-zr}} = A_{\text{st-zr}} \cdot \alpha_{\text{zr}} \cdot (\vartheta_{\text{st},i} - \vartheta_{\text{zr},i}). \quad (5.50)$$

Prijenos topline stijenka-4. sloj PCM-a se tijekom fazne promjene opisuje zajedničkim djelovanjem konvekcije i kondukcije (ovisnost o udjelu krute faze), u krutom stanju samo kondukcijom te u potpuno rastaljenom samo konvekcijom. V_{omjer4} služi kao koeficijent smanjenja intenziteta provođenja topline kroz 4. sloj.

$$q_{\text{konv,st-4}} = (A_{\text{k,u}} - A_{\text{st-zr}}) \cdot (1 - x_{i,4}) \cdot (\vartheta_{\text{st},i} - \vartheta_{\text{PCM},i,4}) \quad (5.51)$$

$$q_{\text{kond,st-4}} = \frac{4\pi \cdot (\vartheta_{\text{st},i} - \vartheta_{\text{PCM},i,4}) \cdot V_{\text{omjer4}}}{\frac{r_4 - r_3}{2 \cdot \lambda_{i,4}}} \quad (5.52)$$

Temperatura zraka se dobiva na sljedeći način:

$$M_{\text{zr},i} \cdot c_{\text{zr},i} \cdot \frac{d\vartheta_{\text{zr},i}}{dt} = q_{\text{konv,st-zr}} - q_{\text{konv,zr-3}} - q_{\text{konv,zr-4}}, \quad (5.53)$$

gdje su toplinski uzrokovani konvekcijom prema 3. i 4. sloju PCM-a:

$$q_{\text{konv,zr-3}} = A_{\text{zr-3}} \cdot \alpha_{\text{zr}} \cdot (\vartheta_{\text{zr},i} - \vartheta_{\text{PCM},i,3}), \quad (5.54)$$

$$q_{\text{konv,zr-4}} = A_{\text{zr-3}} \cdot \alpha_{\text{zr}} \cdot (\vartheta_{\text{zr},i} - \vartheta_{\text{PCM},i,4}). \quad (5.55)$$

Entalpijska jednačba 4. sloja PCM-a:

$$M_{\text{PCM},i,4} \cdot \frac{dh_{\text{PCM},i,4}}{dt} = q_{\text{konv,st-4}} + q_{\text{kond,st-4}} + q_{\text{konv,zr-4}} - q_{\text{kond,4-3}}, \quad (5.56)$$

gdje je provođenje prema 3. sloju:

$$q_{\text{kond,4-3}} = \frac{4\pi \cdot (\vartheta_{\text{PCM},i,4} - \vartheta_{\text{PCM},i,3})}{\frac{r_4 - r_3}{r_3 \cdot (r_3 + r_4) \cdot \lambda_{i,4} \cdot V_{\text{omjer4}}} + \frac{r_4 - r_3}{r_3 \cdot (r_2 + r_3) \cdot \lambda_{i,3} \cdot V_{\text{omjer3}}}}. \quad (5.57)$$

Temperatura se iz entalpije računa kao:

$$\vartheta_{\text{PCM},i,j} = \begin{cases} \frac{h_{\text{PCM},i,j}}{c_{\text{PCM,kruto}}}, & \text{za } h_{\text{PCM},i,j} < h_{\text{PCM,poc.talj.}} \\ \vartheta_{\text{talj}}, & \text{za } h_{\text{PCM,poc.talj.}} < h_{\text{PCM},i,j} < h_{\text{PCM,poc.talj.}} + L_{\text{PCM}} \\ \frac{h_{\text{PCM},i,j} - (h_{\text{PCM,poc.talj.}} + L_{\text{PCM}})}{c_{\text{PCM,tekuće}}} + \vartheta_{\text{talj}}, & \text{za } h_{\text{PCM},i,j} > h_{\text{PCM,poc.talj.}} + L_{\text{PCM}}, \end{cases} \quad (5.58)$$

gdje su:

$c_{\text{PCM,kruto/tekuće}}$ [J/(kgK)] – specifični toplinski kapacitet PCM-a u krutom/tekućem stanju,

ϑ_{talj} [°C] – temperatura taljenja PCM-a,

$h_{\text{PCM,poc.talj.}}$ = $c_{\text{PCM,kruto}} \cdot \vartheta_{\text{talj}}$ [J/kg] – specifična entalpija PCM-a na početku taljenja,

L_{pcm} [J/kg] – latentna toplina taljenja.

Izračun entalpije 3. sloja:

$$M_{\text{PCM},i,3} \cdot \frac{dh_{\text{PCM},i,3}}{dt} = q_{\text{kond,4-3}} + q_{\text{konv,zr-3}} - q_{\text{kond,3-2}}, \quad (5.59)$$

gdje je provođenje prema 2. sloju:

$$q_{\text{kond,3-2}} = \frac{4\pi \cdot (\vartheta_{\text{PCM},i,3} - \vartheta_{\text{PCM},i,2})}{\frac{r_3 - r_2}{r_2 \cdot (r_2 + r_3) \cdot \lambda_{i,3} \cdot V_{\text{omjer3}}} + \frac{r_2 - r_1}{r_2 \cdot (r_1 + r_2) \cdot \lambda_{i,2}}}. \quad (5.60)$$

Izračun entalpije 2. sloja:

$$M_{\text{PCM},i,2} \cdot \frac{dh_{\text{PCM},i,2}}{dt} = q_{\text{kond},3-2} - q_{\text{kond},2-1}, \quad (5.61)$$

gdje je provođenje prema 1. sloju:

$$q_{\text{kond},2-1} = \frac{4\pi \cdot (\vartheta_{\text{PCM},i,2} - \vartheta_{\text{PCM},i,1})}{\frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot (r_1 + r_2) \cdot \lambda_{i,2}}}. \quad (5.62)$$

I naposljetku, izračun entalpije 1. sloja je

$$M_{\text{PCM},i,2} \cdot \frac{dh_{\text{PCM},i,1}}{dt} = q_{\text{kond},2-1}. \quad (5.63)$$

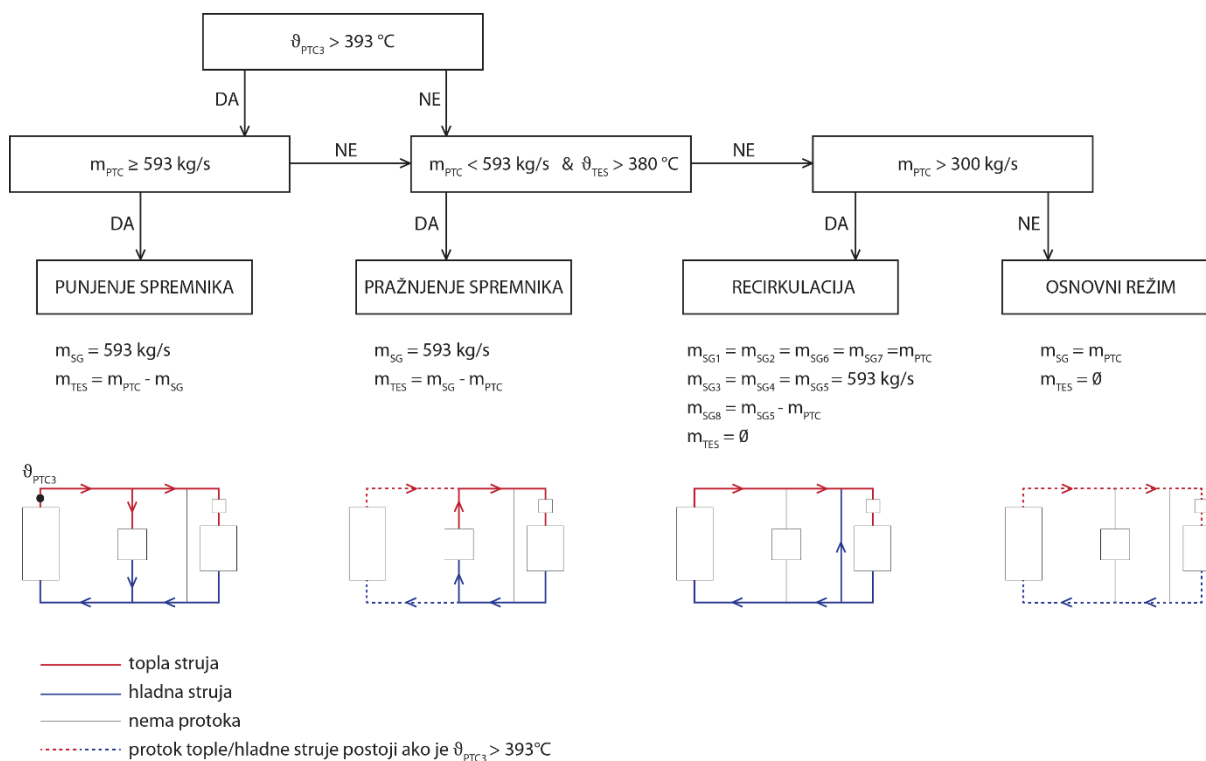
6. Simulacija pogona

Uvedeno je 4 karakteristična režima rada:

- Osnovni režim – u generator pare (SG) šalje se sav protok koji prolazi kroz PTC, a HTF u spremnicima miruje,
- Recirkulacija – glavna svrha je forsiranje starta elektrane u jutarnjim satima vraćanjem dijela protoka sa izlaza iz SG na mješalište prije dodatnog grijača, a time i maksimalna uporaba grijača (dalje Boiler),
- Punjenje spremnika – u vrijeme kada je protok kroz PTC veći od nazivnog, prema spremnicima struji višak HTF i
- Pražnjenje spremnika – nakon pada protoka kroz PTC ispod nazivne vrijednosti, TES sustav nadomješta razliku u protoku koji ide prema SG

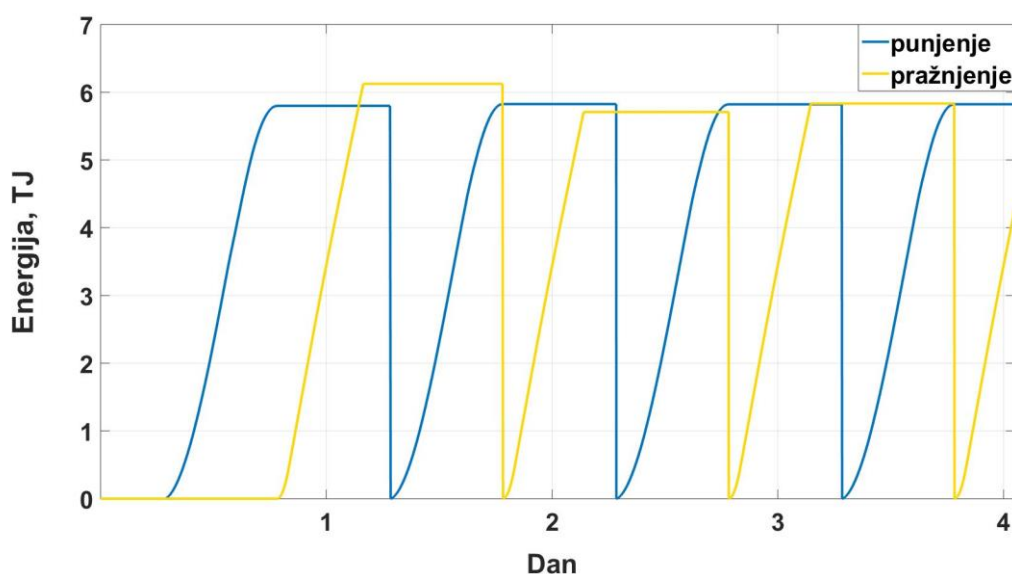
Nakon završetka pražnjenja, odnosno kada temperatura iznad najgornjeg sloja spremnika padne ispod zadane vrijednosti (ovdje je ona 380 °C), elektrana ulazi u osnovni režim, što u većini godine znači gašenje postrojenja jer ne postoji protok kroz PTC. Boiler po potrebi nadoknađuje razliku između 393 °C i temperature dolaznog HTF-a (točka SG3 na slici 11), osim ako nije dosegnuta maksimalna snaga od 30 MW, u svim režimima rada izuzev osnovnog.

Regulacijska shema na slici 20 prikazuje način odabira prethodnih režima rada. Za lakše praćenje slike, kao i ostatka rada, čitatelja se upućuje na shemu postrojenja iz 5. poglavlja (slika 11). Regulacija u stvarnosti, na temelju ulaznih parametara, određuje režim rada zadavanjem željenih pozicija ventila, brzina vrtnje pumpe HTF-a i snagu dodatnog grijača. U ovome se simulacijskom modelu matematički ne modeliraju ventili i pumpe, nego se direktno zadaje željena vrijednost protoka, koja se u model postrojenja, zbog tromosti spomenutih izvršnih organa i mase HTF-a, uvrštava koristeći prijenosne funkcije. Radi praktičnosti, u nastavku m_{TES} označava ukupan protok koji prolazi kroz TES sustav.



Slika 20. Odabir režima rada

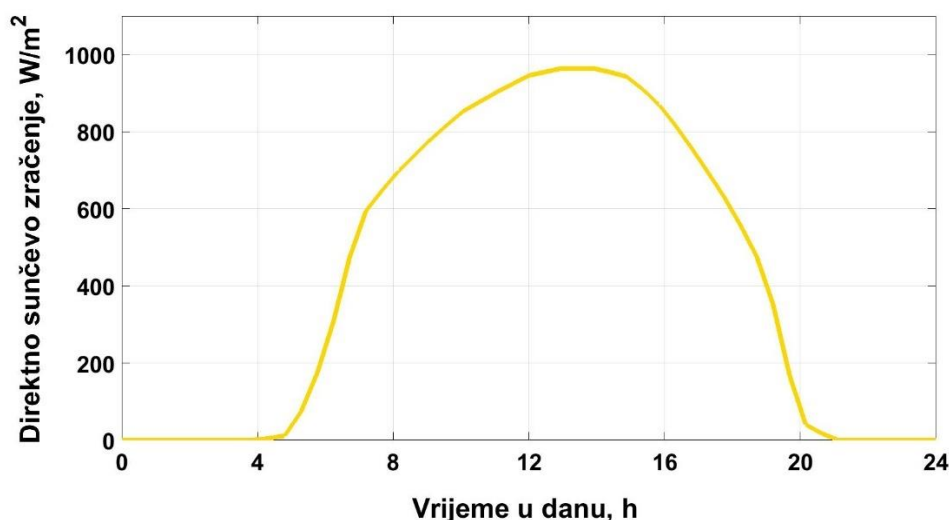
Zaključci izneseni u nastavku doneseni su na temelju ustaljenog profila rada elektrane, koji se dobiva tek nakon nekoliko dana rada, odnosno kada se izjednače iznosi spremniku predane i od njega primljene energije, što prikazuje slika 21. Bržem postizanju spomenutog izjednačenja pomaže dobra pretpostavka temperaturne stratifikacije unutar spremnika u početnom trenutku.



Slika 21. Primljena i izdana energija spremnika, tijekom 4 dana

6.1. Utjecaj konstrukcijskih parametara TES-a

Prije nego što se pokažu rezultati interakcije između TES sustava i ostatka postrojenja i detaljnije objasne uzročno-posljedične veze, prikazati će se odabir konstrukcijskih parametara spremnika: volumen spremnika, dimenzije kapsula i vrstu materijala fazne pretvorbe. U svim je slučajevima omjer promjera i visine spremnika $\frac{D_{\text{spremnik}}}{H_{\text{spremnik}}} = 2$, a za profil direktnog sunčevog zračenja (slika 22) na kojem će se ispitivati parametri koristi se 120% prosječnih satnih vrijednosti u mjesecu srpnju. Množenje podataka s faktorom 1.2 omogućuje dimenzioniranje spremnika za uporabu čak i tijekom nadprosječno osunčanih dana. Kada bi se odredio volumen spremnika koji je optimalan za prosječnu dnevnu insolaciju, isti bi se tijekom ljetnog perioda pregrijao, čime bi došlo do degradacije svojstava HTF-a.



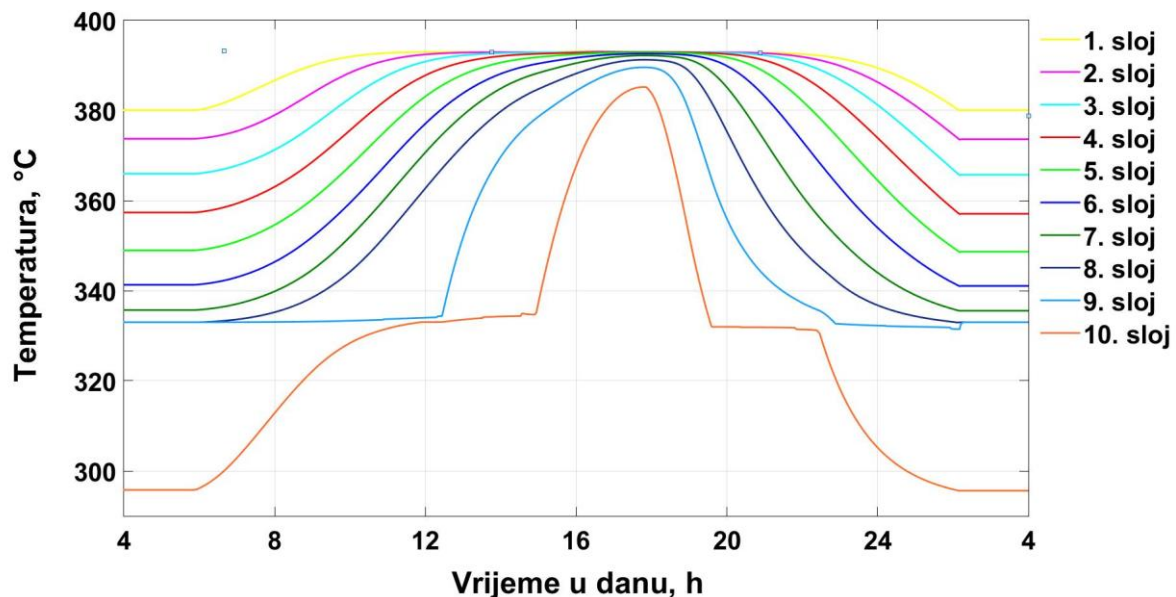
Slika 22. Profil direktnog sunčevog zračenja korišten za dimenzioniranje spremnika

Razmatrane soli u ovome radu su kalijev nitrat (KNO_3) i kalijev hidroksid (KOH), a njihova su svojstva prikazana u tablici 7.

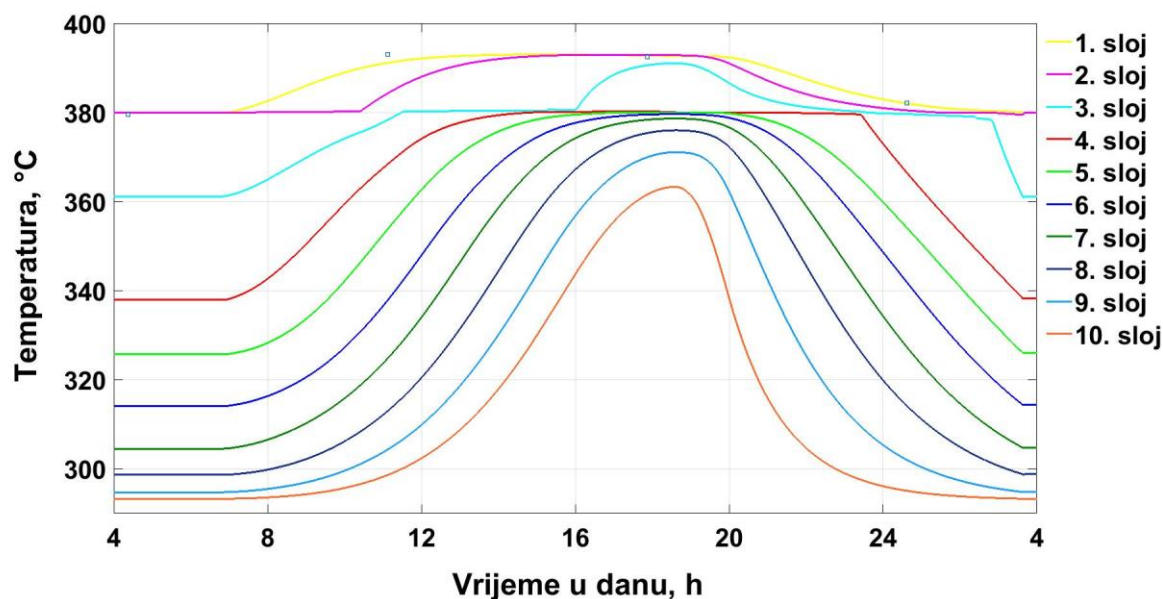
Tablica 7. Svojstva razmatranih soli [11,40,41,42,43,44,45]

	KNO ₃	KOH
ϑ_{talj} [°C]	333	380
$\rho_{\text{PCM,kruto}}$ [kg/m ³]	2110	2044
L_{PCM} [kJ/kg]	226	149.7
$c_{\text{PCM,kruto}}$ [J/(kgK)]	1140	1402
$c_{\text{PCM,tekuće}}$ [J/(kgK)]	1310	1481
λ_{PCM} [W/mK]	0.5	0.5
α [kg/m ³]	2315	2013
β [kg/(m ³ K)]	0.729	0.4396

Slika 23 prikazuje raspodjelu temperature ulja u spremniku tijekom jednog ciklusa, za promjer spremnika $D_{\text{spremnik}} = 30$ m i promjer kapsula $d_{k,v} = 1$ cm. Primjećuje se da je oko 17h i 30 min većina slojeva zagrijana na maksimalno dozvoljenu vrijednost te da su samo zadnja tri sloja sudjelovala u faznoj pretvorbi, a kroz cijelu pretvorbu je prošao samo PCM iz zadnjeg, odnosno 10. sloja.

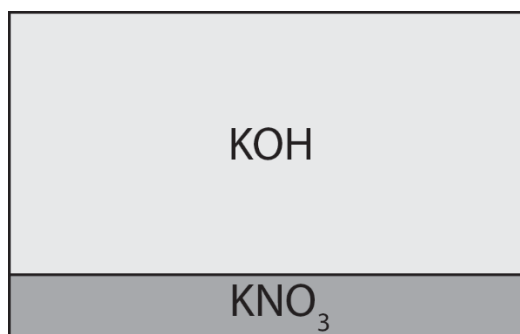
**Slika 23.** Temperature ulja u spremniku za KNO₃ kao PCM, $D_{\text{spremnik}} = 30$ m te $d_{k,v} = 1$ cm

Temperatura odabrana kao granična, za režim pražnjenja, je $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ upravo zato da bi se iskoristila latentna toplina taljenja kalijevog hidroksida, što je i potvrđeno uvidom u temperaturne profile na slijedećoj slici 24. U usporedbi s KNO_3 , ovdje nema neprimjereno visokih temperatura svih slojeva, što je posljedica veće iskorištenosti fazne promjene, te se zaključuje da se uporabom KOH-a dimenzije spremnika mogu smanjiti na promjer manji od 30 m.



Slika 24. Temperature ulja u spremniku za KOH kao PCM, $D_{\text{spremnik}} = 30\text{ m}$ te $d_{k,v} = 1\text{ cm}$

Očigledno je da je KOH primjereniji materijal za ovu svrhu, no uvidom u tablicu 7 se primjećuje vrlo visoka latentna toplina taljenja KNO_3 te je iz želje da se to svojstvo i iskoristi isproban, kaskadni sustav s obje soli. U zadnja dva sloja se nalazi PCM niže temperature taljenja – KNO_3 , a u ostatku je KOH (slika 25).

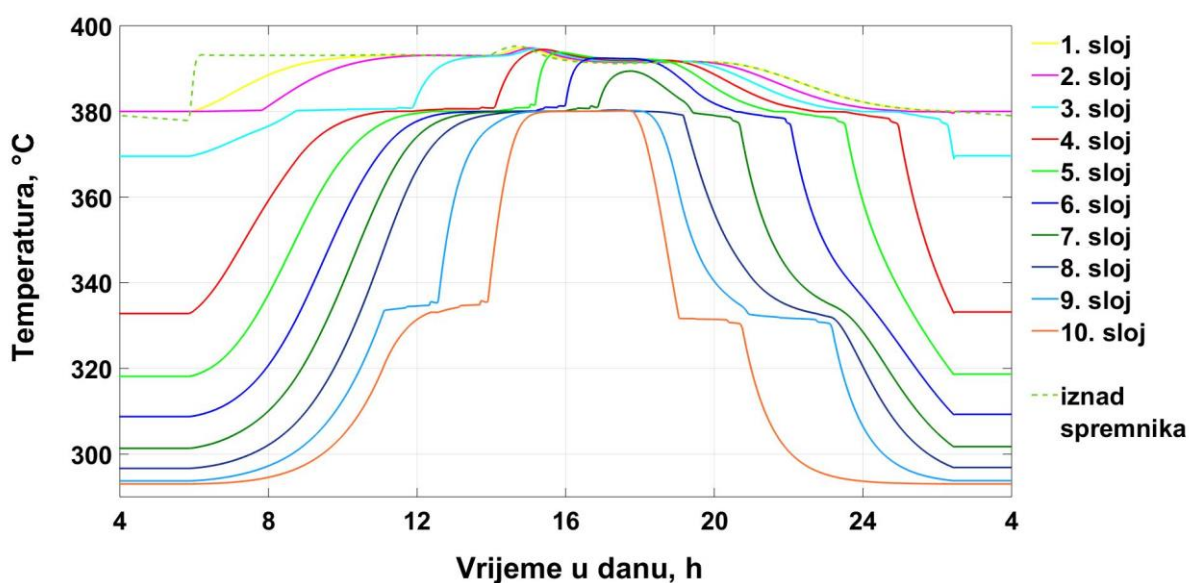


Slika 25. Kaskadni sustav s dvije vrste PCM-a

Iterativnim je postupkom određen volumen spremnika, a uvjeti koje je odabrana izvedba trebala zadovoljiti su:

1. svi slojevi moraju tijekom jednog ciklusa sudjelovati u faznoj pretvorbi,
2. temperatura ulja 10. sloja mora doseći najmanje 360 °C i
3. PCM 8. sloja se ne smije u potpunosti rastaliti

Prethodne je uvjete zadovoljio sustav spremnika s promjerom 25 m, a njegovi su temperaturni profili prikazani na slici 26.

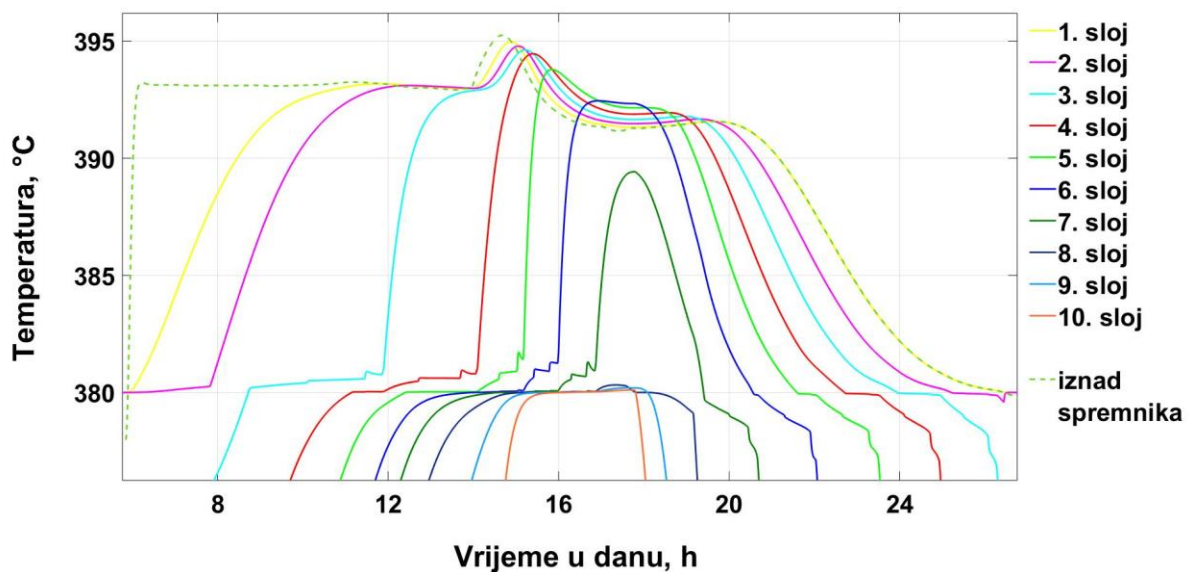


Slika 26. Temperature ulja u spremniku za kaskadnu izvedbu, $D_{\text{spremnik}} = 25$ m te $d_{k,v} = 1$ cm

Dodatna prednost predložene kombinacije soli, u odnosu na samo KOH, su manji toplinski gubici u PTC-u zbog manje temperature na ulazu. Ona je uzrokovana duljim zadržavanjem temperature 10. sloja na niskim vrijednostima. Slika 27 je uvećani prikaz prethodne slike, gdje se može jasnije vidjeti tijek fazne pretvorbe i prelaženje između režima punjenja i pražnjenja.

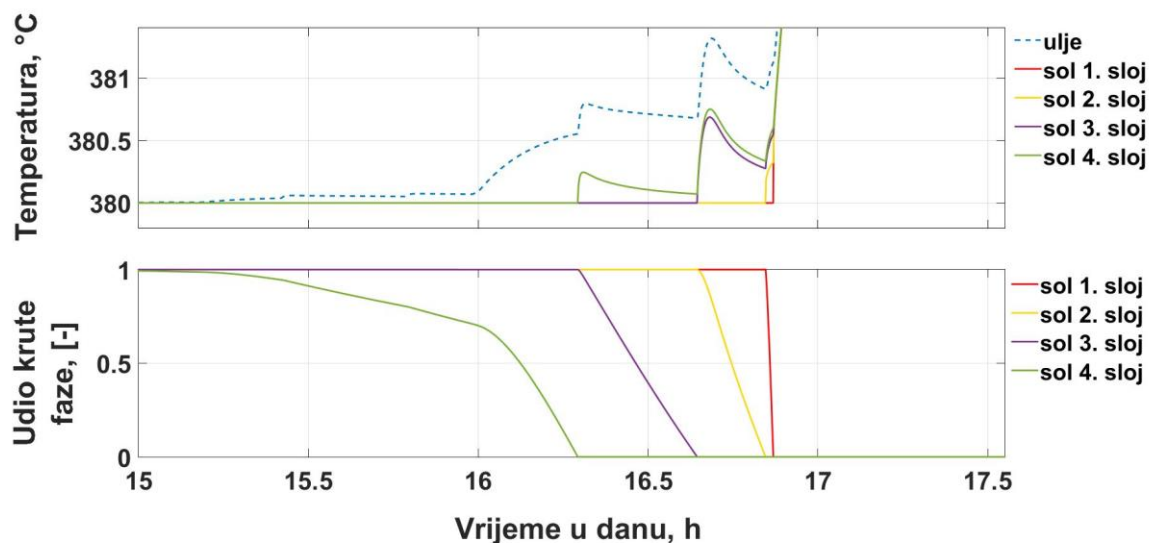
Kod prvih se 6 slojeva događa zanimljiva pojava, odnosno krivulje temperature dvaput se presijecaju. Prvo je križanje uzrokovano padom temperature na izlazu iz PTC-a, a ovdje se taj pad manifestira na temperaturi u cjevovodu iznad spremnika – isprekidana zelena linija (u 14h i 30min). Ide li se korak dalje u razmišljanju o uzročno–posljedičnim vezama, dolazi se do zaključka da je nagli pad ϑ_{PTC3} uzrokovan prvotnim rastom, nastalog zbog sporog odziva PID regulatora (slika 12) (u stvarnosti tromosti izvršnih organa), odnosno nedovoljno brzim

povećanjem m_{PTC} u trenutku naglog povećanja ϑ_{PTC2} . Pošto se tijekom punjenja m_{TES} miješa s m_{SG} , koji napaja PTC, razlog povećanja ϑ_{PTC2} je nagli porast temperature u 10. sloju spremnika, te na posljétku, temp. je 10. sloja porasla zbog završetka fazne pretvorbe KNO_3 , tijekom koje je referentna temp. HTF-a u prosjeku blago rastuća funkcija – slika 26. Tako HTF niže temperature potiskuje topliji prema dolje, te se u kratkom vremenskom razdoblju (17h – 18h) sloj 6 ističe kao najtopliji. S početkom pražnjenja dolazi drugo križanje, a temperaturna stratifikacija polako poprima svoj uobičajeni izgled.



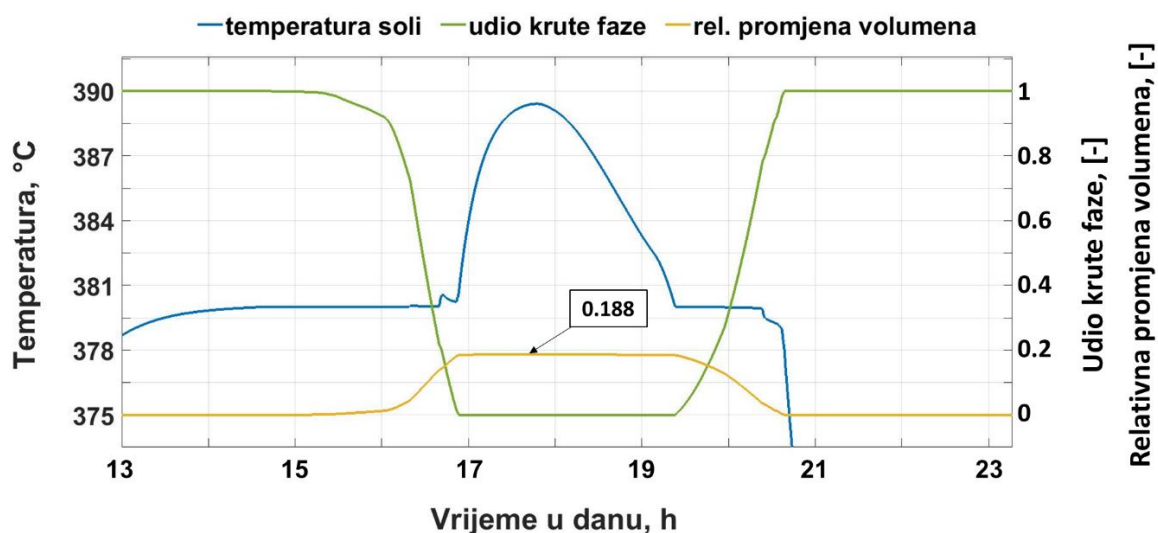
Slika 27. Temperature ulja u spremniku za kaskadnu izvedbu, $D_{\text{spremnik}} = 25 \text{ m}$ te $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$, uvećani prikaz

Kako bi se odagnalo podrijetlo skokovite krivulje temperature HTF-a tijekom taljenja PCM-a, referencirati će se na sljedeću sliku. Slika 28 prikazuje temperature ulja, slojeva soli i udio krute faze pojedinog sloja kapsule, u 7. sloju spremnika, tijekom fazne pretvorbe do koje dolazi u vrijeme režima punjenja. Ulje je veće temperature nego sol, jer dolazi iz viših (toplijih) slojeva. Nakon što se 4. (vanjski) sloj soli, uz konstantnu temperaturu, u potpunosti rastalio, temperatura ulja je naglo porasla zbog istovremenog naglog porasta temp. 4. sloja. Početkom taljenja 3. sloja dolazi do pada temperature ulja i 4. sloja zbog porasta toplinske provodnosti 3. sloja. Isti se procesi zbivaju dalje 2. i 1. sloju. Dakle, ovakav je izgled krivulje ulja posljedica konačnog broja modeliranih slojeva soli (ovdje 4), te se zaključuje da bi se diskretizacijom kapsule u više slojeva izbjegla pojava skokovitosti.

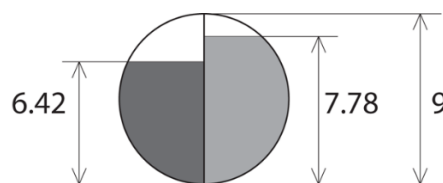


Slika 28. Temperature ulja i slojeva soli (gore) i udjeli krute faze u 7. sloju spremnika (dolje)

Prema Archibold [46] promjena volumena PCM-a $\left(\frac{\Delta V}{V_{\text{PCM}, \text{kruto}}}\right)$ tijekom fazne pretvorbe može doseći čak 22%. Slika 29 prikazuje relativnu promjenu volumena, srednju temperaturu i srednji udio krute faze soli KOH u 7. sloju spremnika. Najveća zabilježena promjena je ovdje $\frac{\Delta V}{V_{\text{PCM}, \text{kruto}}} = 18.8\%$. Na slici 30 je prikazana usporedba visine PCM-a u kapsuli prije i poslije fazne promjene (unutarnji promjer kapsule je $d_{k,v} = 9$ mm).



Slika 29. Srednja temperatura, srednji udio krute faze i relativna promjena volumena soli u 7. sloju spremnika

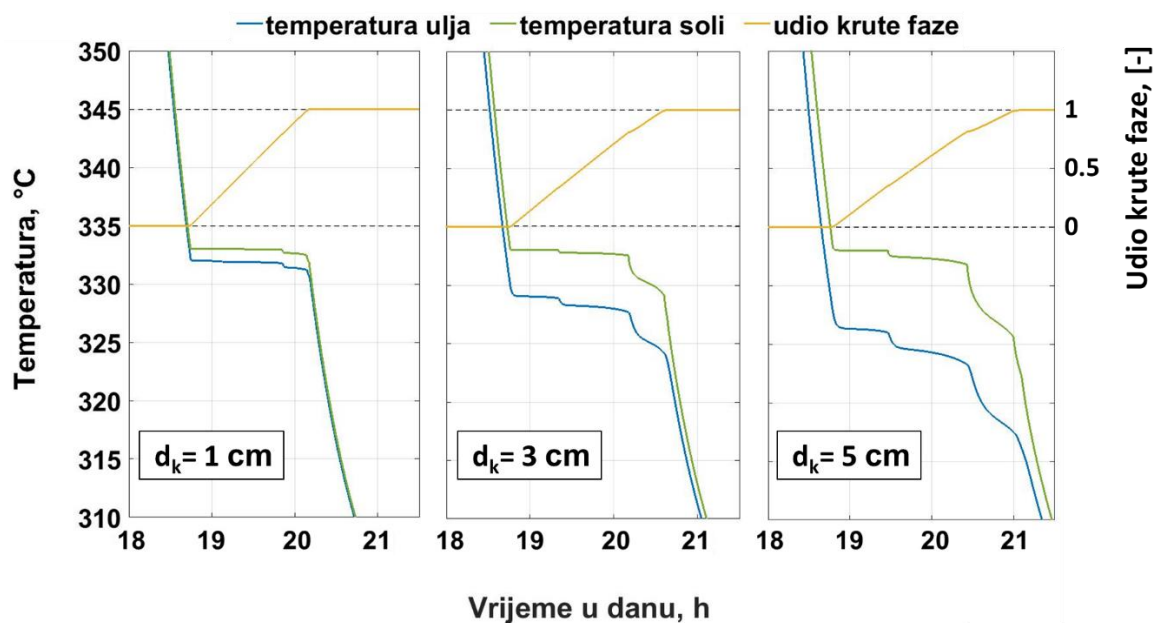


Slika 30. Visina soli [mm] u kapsuli 7. sloja spremnika, prije i nakon fazne pretvorbe

Razmotreno je tri veličine kapsula:

1. $d_{k,v} = 10 \text{ mm}$, $\delta_{st} = 0.5 \text{ mm}$
2. $d_{k,v} = 30 \text{ mm}$, $\delta_{st} = 1 \text{ mm}$
3. $d_{k,v} = 50 \text{ mm}$, $\delta_{st} = 1.5 \text{ mm}$

Povećavanjem kapsula, vrijeme rada elektrane se smanjuje, iako minimalno (npr. razlika između izvedbe 10 mm i 30 mm je $\sim 5 \text{ min}$), te se veća promjena u dinamici rada CSP-a kod kapsule od 1 i 5 cm ne primjećuje. Kapsule veće od 5 cm nisu simulirane jer se pretpostavlja da to ne bi doprinijelo poboljšanju sustava. Dakle, za nastavak rada usvojena je izvedba s $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$. Profili temperature ulja u spremnicima kod svih kapsula izgledaju vrlo slično, no zapaža se utjecaj mase PCM-a i dostupne površine izmjene topline između HTF-a i PCM-a, prikazan na slici 31. Razlika u vremenu skrućivanja soli KNO_3 u 10. sloju spremnika između $d_{k,v} = 5 \text{ cm}$ i $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$ je $\sim 50 \text{ min}$.



Slika 31. Temperatura ulja, srednja temperatura soli i srednji udio krute faze 10. sloja spremnika, u vrijeme pražnjenja, za različite veličine kapsula

Sada, nakon što je odabrana zadovoljavajuća izvedba spremnika, tablično će se dati usporedba najvažnijih karakteristika između ovdje modeliranog te postojećeg TES-a u postrojenju Andasol 1 [32], tablica 8.

Tablica 8. Usporedba karakteristika modeliranog i postojećeg TES sustava u Andasol 1

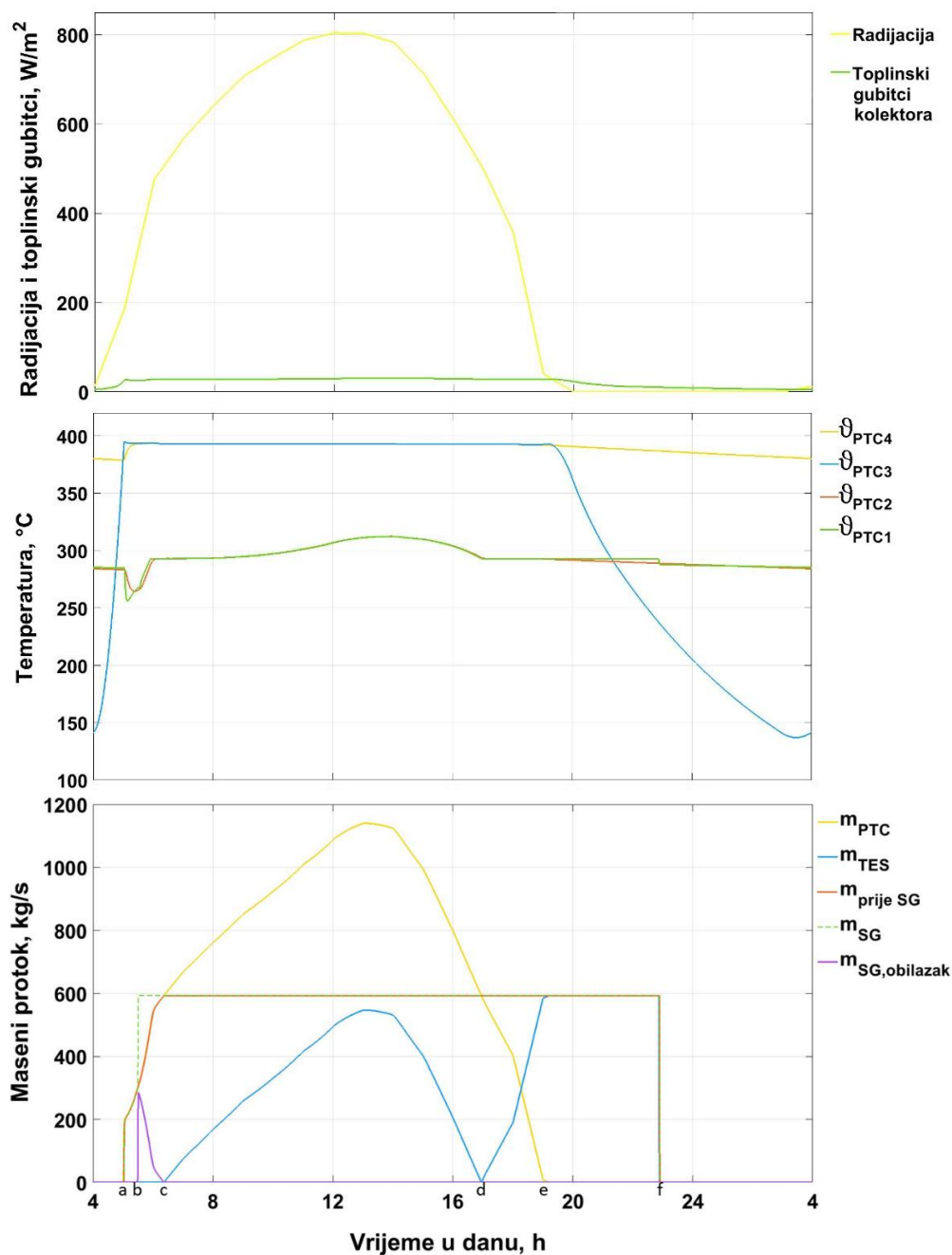
Izvedba TES-a	Indirektni sustav s dva spremnika osjetne topline (Andasol 1)	Spremnik latentne topline s kapsulama
Kapacitet pohrane	1010 MWh _{th}	1610 MWh _{th} ¹
Broj spremnika	2	4
Ukupna masa soli	28 800 t 60% NaNO ₃ / 40% KNO ₃	15 468 t KOH + 3987 t KNO ₃
Izmjenjivač topline u TES-u	DA	NE

¹Energija predana spremniku – slika 21

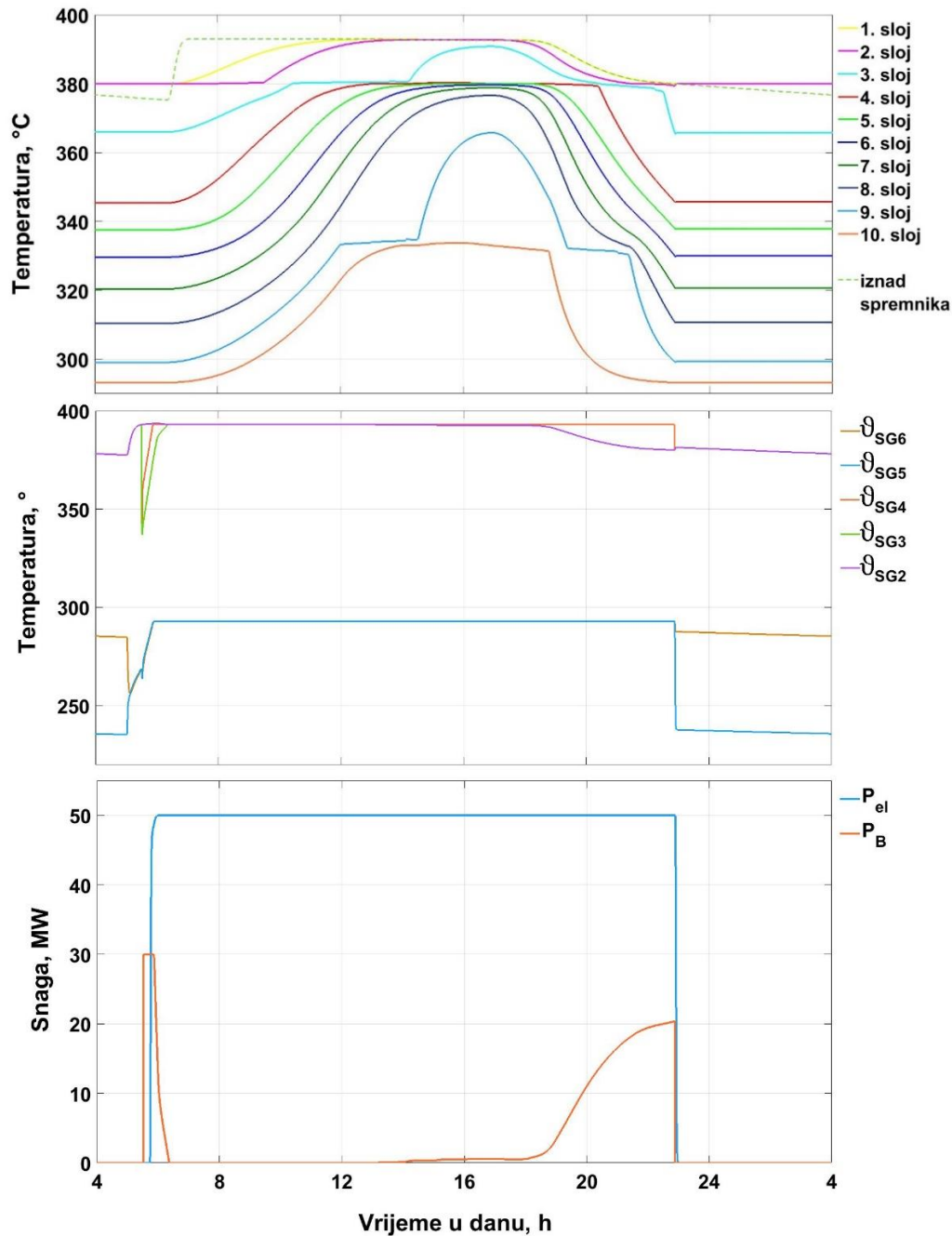
Prednosti spremnika latentne topline su 59% veći kapacitet pohrane, 32% manja masa solarne soli i izbjegnuta potreba za izmjenjivačem ulje–sol. Također treba napomenuti da se spremnik osjetne topline tijekom mirovanja (npr. zimski dani sa smanjenom insolacijom) mora održavati na temperaturi koja je iznad točke krutišta medija pohrane topline. Ispunjenje navedenog zahtjeva potrebno je kako bi se izbjeglo nepoželjno skrućivanje u izmjenjivačkim i drugim cijevima TES sustava, što može dovesti do pojave deformacije stijenki. S druge strane, osim kapsula, u spremnicima latentne topline se nalazi i ukupno 8340 m³ skupog sintetičkog ulja. Naposljetku, sam postupak izrade kapsula s PCM-om na ekonomski prihvatljiv način predstavlja dodatan tehnološki izazov.

6.2. Dinamičke značajke postrojenja

Slika 32 prikazuje sunčevo zračenje, toplinske gubitke kolektora i masene protoke u CSP-u, a slika 33 temperature ulja u spremniku i SG-u te snagu dodatnog grijača i proizvedenu el. energiju. Ovdje su korištene prosječne satne vrijednosti zračenja u mjesecu srpnju. Na dijagramu masenih protoka su na apscisi, osim vremena, navedene i oznake karakterističnih trenutaka u danu (tretirati će ih se kao vrijeme) koje će služiti za lakšu analizu rada.



Slika 32. Radijacija i gubici u PTC-u (gore), temperature u PTC-u (sredina) i maseni protoci u postrojenju (dolje)

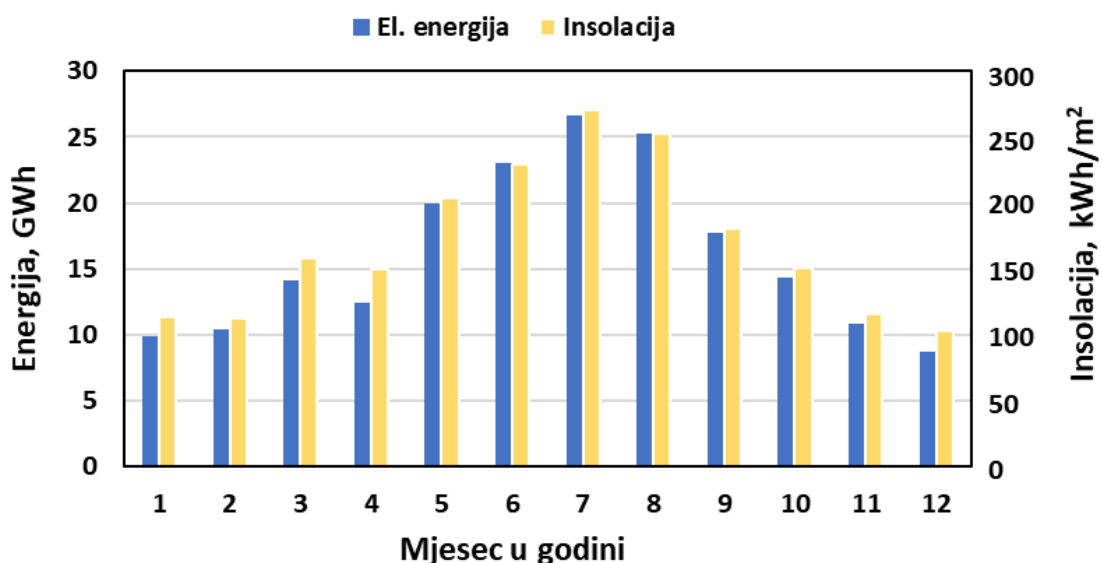


Slika 33. Temperature ulja u TES-u (gore) i SG-u (sredina) te toplinska snaga dodatnog grijača i snaga na električnom generatoru

Prve sunčeve zrake na zrcala padaju oko 4 h, preko noći ohlađena ϑ_{PTC3} počinje polako rasti i u točki **a** dostiže 393 °C. Tada PID regulator počinje povećavati protok kroz PTC. U isto vrijeme ulazna temp. u PTC ϑ_{PTC2} napravi negativan skok uzrokovan doticanjem nešto hladnijeg protoka m_{SG} . U točki **b** maseni protok kroz PTC doseže 300 kg/s i elektrana prelazi s *osnovnog režima* na *recirkulaciju*. Hladni HTF nakon SG-a, temperature ϑ_{SG5} , protokom $m_{SG,obilazak}$ se vraća prije Boilera da bi se pomiješao s protokom koji dolazi iz PTC-a. Tako

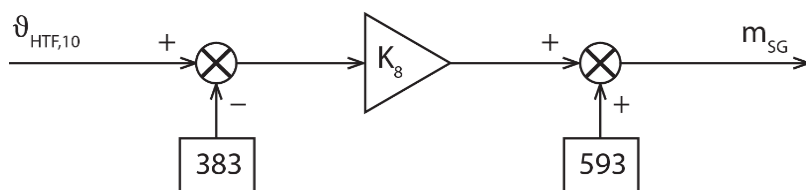
polutopla struja (negativan skok ϑ_{SG3}) dolazi do Boilera, koji radi maksimalnom snagom pokušavajući zagrijati ulje do $393\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uspijeva do ϑ_{SG4} . Nakon progrijavanja SG-a, turbina kreće sa sinkronizacijom, što traje približno 10 min. Prelaskom m_{PTC} preko 593 kg/s , trenutak **c**, obilazni se vod zatvara, a višak protoka se šalje u TES, čime počinje *punjenje*. Tijekom punjenja se, zbog povećanja temperature na izlazu iz spremnika, povećava i ϑ_{PTC1} te toplinski gubici u PTC-u lagano rastu. Insolacija oko 13 h doseže svoj maksimum, nakon čega i nagib krivulja protoka m_{PTC} i m_{TES} postaje negativan. U točki **d** je $m_{PTC} < 593\text{ kg/s}$ te strujanje u spremniku mijenja smjer, odnosno nastupa režim *pražnjenja*. U razdoblju od **d** do **e** TES samo potpomaže napajanje SG-a, a nakon trenutka **e** u potpunosti služi kao izvor topline u elektrani. Vrijednost temperature iznad spremnika (crtkana zelena linija na slici 32 gore) je ispod $393\text{ }^{\circ}\text{C}$, što uzrokuje postepeni porast snage Boilera. Nakon otprilike 4 h samostalnog rada TES-a, u **f** se više ne zadovoljava uvjet temperature u spremniku od minimalno $380\text{ }^{\circ}\text{C}$, te se elektrana gasi.

Simulacije su provedene za sve mjesece u godini, a proizvedena električna energija i količina ozračenja prikazani su na slici 34. Mjesečne su vrijednosti dobivene množenjem rezultata dobivenih na jednom danu s brojem dana u referentnom mjesecu. Količina energije varira od 8.65 GWh u prosincu do 26.6 GWh u srpnju, a ukupno generirana energija na godišnjoj je razini 193.23 GWh . Godišnja toplinska snaga proizašla iz dodatnog grijača je 29.68 GWh , a elektrana je 3678 sati radila pri punom opterećenju.

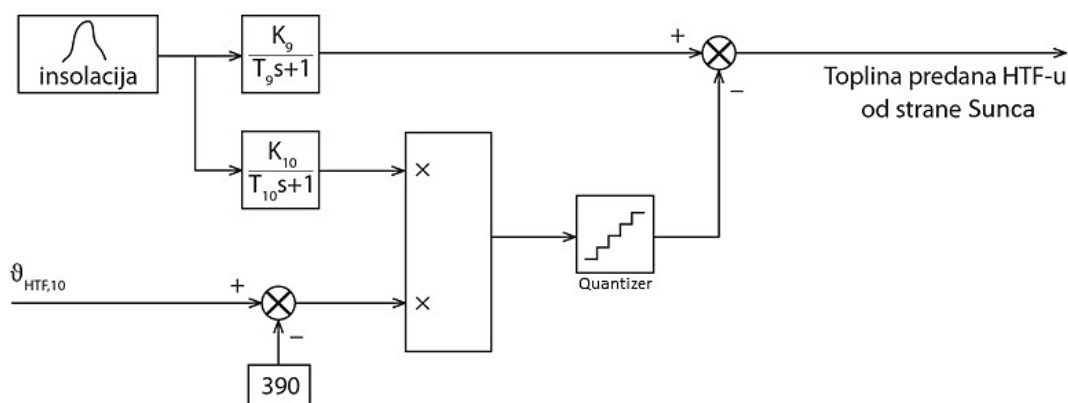


Slika 34. Mjesečne količine proizvedene el. energije i ukupne insolacije

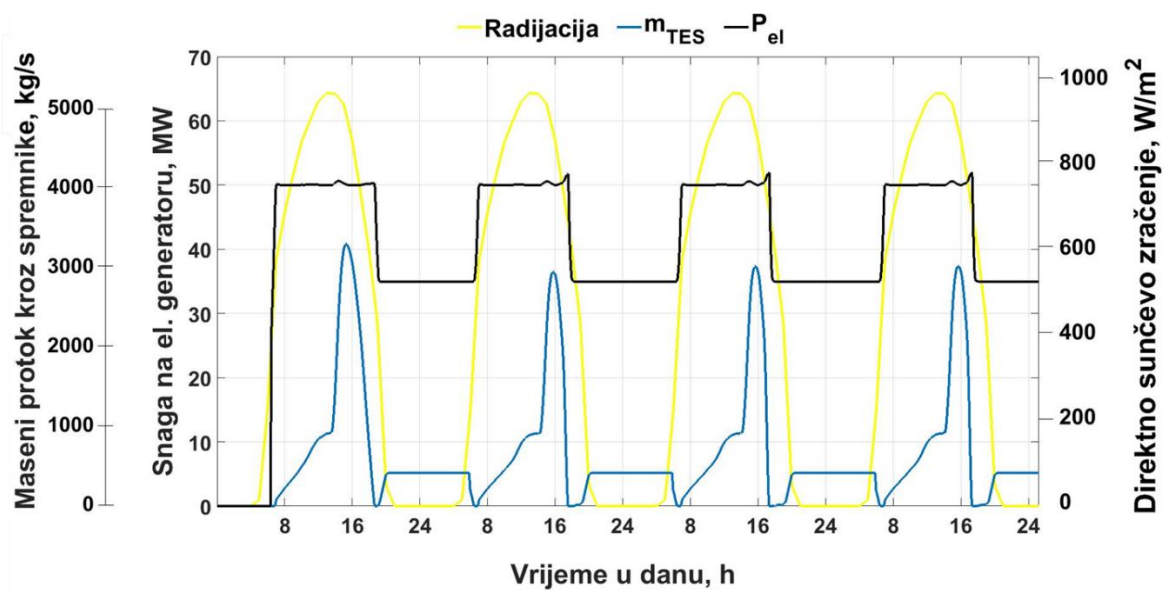
Za kraj rada ispitan je 24-satni rad elektrane, a tijekom sunčeva zračenja, ukupnog masenog protoka kroz spremnike i generirane el. energije prikazani su na slici 37. Preko dana elektrana radi na punoj snazi, dok u režimu pražnjenja kroz spremnik prolazi manje HTF-a nego u klasičnom radu postrojenja, čemu je naposljetku posljedica manja snaga na stezaljkama el. generatora, što je ovdje 35 MW. Kako bi simulacijski model bio u stanju operirati na navedeni način bez da se spremnik tijekom dana pregrije, uveden je regulator povećanja protoka prema SG-u do vrijednosti iznad nazivne (turbina je u stanju proizvesti maksimalno 55 MW). Protok se povećava proporcionalno pozitivnoj razlici $\vartheta_{\text{HTF},10}$ i $383\text{ }^{\circ}\text{C}$. Također je uvedena i regulacija jednoosnog pomicanja zrcala u PTC polju kao krajnja zaštita od pregrijavanja spremnika, koja stupa na snagu kada je $\vartheta_{\text{HTF},10} > 390\text{ }^{\circ}\text{C}$. Navedene regulacijske komponente prikazane su na slikama 35 i 36. Uloga bloka Quantizer na slici 36 je ulazni signal povećavati skokovito, što u stvarnosti simulira odmicanje cijelih kolektorskih jedinica.



Slika 35. Regulacija povećanja protoka prema SG-u u režimu punjenja



Slika 36. Regulacija zakretanja zrcala



Slika 37. 24-satni režim rada tijekom ljetnih dana

7. Zaključak

Analizom rezultata simulacija dokazane su kvalitete uporabe spremnika latentne topline. Zatvaranjem materijala pohrane u sferične kapsule riješen je problem niske toplinske vodljivosti, a zbog postojanja praznine u kapsuli omogućena je slobodna promjena volumena do koje dolazi uslijed taljenja.

Između kalijevog nitrata (KNO_3) s temperaturom tališta $333\text{ }^\circ\text{C}$ i kalijevog hidroksida (KOH) s $380\text{ }^\circ\text{C}$, boljim se pokazao PCM više točke tališta. Udio KOH -a u spremniku koji tijekom jednog dana sudjeluje u faznoj pretvorbi bio je veći. Time su i vršne temperature pojedinih slojeva spremnika bile manje, što je indikator potencijalnog smanjenja potrebnog volumena spremnika. Kombinacijom oba kandidata, gdje se kapsule s KNO_3 nalaze samo u donjih 20% volumena spremnika postignuta je zadovoljavajuća gustoća pohranjene energije te se dalje iterativnim postupkom odredio optimalan volumen cijelog spremnika. Između razmatranih veličina kapsula, najboljom se pokazala izvedba s promjerom 1 cm, kod koje je uočen najbolji prijenos topline, prvenstveno uzrokovan povećanom površinom izmjene topline.

Napravljene su usporedbe s postojećim sustavom pohrane u Andasol 1 s dva spremnika osjetne topline, po čijim je parametrima u Simulink-u modelirana elektrana. Prednosti ovdje odabrane izvedbe spremnika latentne topline su 59% veći kapacitet pohrane, 32% manje mase solarne soli i izbjegnuta potreba za izmjenjivačem topline. S druge strane, nedostaci su postojanje dodatnih 8340 m^3 sintetičkog ulja i pitanje ekonomski isplativog načina izrada kapsula. Temeljem rezultata simulacija s prosječnim satnim vrijednostima sunčeva zračenja u referentnom mjesecu došlo se do saznanja da je elektrana na godišnjoj razini u stanju proizvesti 193.23 GWh el. energije i raditi 3678 h pri nazivnoj snazi od 50 MW , dok ukupna toplinska energija proizašla iz dodatnog grijača iznosi 29.68 GWh . Pokazana je sposobnost postrojenja da tijekom nadprosječno osunčanih srpanjskih dana besprekidno proizvodi el. energiju, tako da u režimu punjenja snaga na el. generatoru iznosi 50 MW , a u režimu pražnjenja 35 MW .

Opsežnije istraživanje problema, koje bi uključivalo CFD analizu prijenosa tvari i topline, ponudilo bi realniju sliku dinamičkih procesa u spremniku, a time i preciznije značajke projektiranog postrojenja. Na kraju, zaključeno je da adekvatna primjena visoko-temperaturnih spremnika latentne topline može značajno pridonijeti povećanju iskoristivosti obnovljivih izvora energije i time potpomoći stvaranju niskougljične budućnosti.

Literatura

- [1] Sarbu, A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage, Sustainability, 2018.
- [2] H. Müller-Steinhagen, Freng and Franz Trieb, Concentrating solar power, Institute of technical thermodynamics, German Aerospace Centre
- [3] International Renewable Energy Agency, Renewable energy technologies: cost analysis series, Volume 1: Power Sector, Issue 2/5, Concentrating Solar Power, 2012.
- [4] A. Marušić, Poboljšanje dinamičkih značajka visokotemperaturnih spremnika latentne topline, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [5] S. Kuravi et al., Thermal energy storage for concentrating solar power plants, Progress in Energy and Combustion Science, 2013.
- [6] M. Vivar et al., Effect of soiling in CPV systems, Solar Energy, 2010
- [7] Renewable Global Status Report 2019, <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>, pristup 7.11.2019.
- [8] E. Flores, A Review of Latent Heat Thermal Energy Storage for Concentrated Solar Plants on the Grid, Journal of Undergraduate Research, 2015.
- [9] Pei Wen Li et al., Transient Heat Transfer and Energy Transport in Packed Bed Thermal Storage Systems, Developments in Heat Transfer, 2011.
- [10] National Renewable Energy Laboratory, System Advisor Model (SAM) Case Study: Andasol-1
- [11] S. Kuravi et al, Thermal Energy Storage for Concentrating Solar Power Plants, Technology and Innovation, 2012.
- [12] Concentrating solar thermal technology status, Informing a CSP Roadmap for Australia, ITP, 2018.
- [13] Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Maricopa Solar Power Dish Plant, <https://www.energy.gov/eere/solar/downloads/maricopa-solar-power-dish-plant>, pistup 7.11.2019.
- [14] IEEE Spectrum, China Stumbles on Path to Solar Thermal Supremacy, <https://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/solar/china-stumbles-on-path-to-solar-thermal-supremacy>, pistup 7.11.2019.
- [15] Solar Thermal, Parabolic Trough Solar Thermal Power Plant, <https://solarthermalpitsugoko.blogspot.com/2017/03/parabolic-trough-solar-thermal-power.html>, pistup 7.11.2019.

- [16] Bayer, Fresnel Collector, <http://www.bayercompany.com/fresnel-collector/>, pristup 7.11.2019.
- [17] M. Kenisarin, K. Mahkamov, Solar energy storage using phase change materials, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006.
- [18] A. de Gracia, L.F. Cabeza, Phase change materials and thermal energy storage for buildings, Energy and Buildings, 2015.
- [19] Toplinske tablice, Fakultet Strojарstva i Brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [20] I. Gabrić, S. Šitić, Materijali 1, Konstrukcijsko strojarstvo, Sveučilišni odjel za stručne studije, Sveučilište u Splitu, 2012.
- [21] L. F. Cabeza, N.H. Steven Tay, High-Temperature Thermal Storage Systems Using Phase Change Materials, Elsevier, 2018.
- [22] L. F. Cabeza, Advances in Thermal Energy Storage Systems, Elsevier, 2015.
- [23] A. Crespo et al., Latent thermal energy storage for solar process heat applications at medium-high temperatures – A review, Solar Energy, 2018.
- [24] B. Buonomo et al., Thermal Behaviors of Latent Thermal Energy Storage System with PCM and Aluminum Foam, International Journal Of Heat And Technology, 2016.
- [25] S. Höhle et al., Macro-Encapsulation of Inorganic Phase-Change Materials (PCM) in Metal Capsules, Materials, 2018.
- [26] J. E. Pacheco, et al., Development of a molten-salt thermocline thermal storage system for parabolic trough plants, Journal of Solar Energy Engineering, 2002.
- [27] Heat and cold storage with PCM, H. Mehling, L. F. Cabeza, Springer, 2008.
- [28] The Chicago Sentinel, Global High-Temperature Phase Change Materials (PCM) Market 2019 by Manufacturers, Regions, Type and Application, Forecast to 2024, 8.10.2019., <https://www.ccsentinel.com/uncategorized/high-temperature-phase-change-materials-pcm-market-headed-for-growth-and-global-expansion-by-2024-with-top-players-basf-honeywell-cryopak-entropy-solutions-inc/>, pristup 10.11.2019.
- [29] Y. Zheng et al., Encapsulated phase change materials for energy storage, Characterization by calorimetry, Solar Energy, 2013.
- [30] L. Solomon, A. Oztekin, Encapsulated Phase Change Materials for use in High Temperature Thermal Energy Storage, Mechanical Engineering and Mechanics, P.C. Rossin College of Engineering and Applied Science, Lehigh University, Bethlehem, USA, 2016.

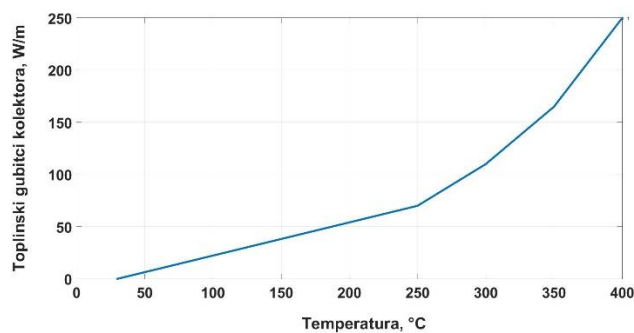
- [31] P. B. Salunkhe, P. S. Shembekar, A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012.
- [32] The parabolic trough power plants Andasol 1 to 3, The largest solar power plants in the world – Technology premiere in Europe, Solar Millennium, dostupno na <https://www.stanford.edu/>, pristup 13.11.2019.
- [33] System Advisor Model (SAM) Case Study: Andasol-1 Aldeire, Spain, NREL
- [34] P. A. G. Gómez, Design and dynamic analysis of steam generators for concentrating solar power plants, Disertacija,, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de ingeniería térmica y de fluidos, 2017.
- [35] EnergyPlus, Weather Data by Location, Granada 084190 (SWEC), dostupno na https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/ESP//ESP_Granada.084190_SWEC, pristup 15.11.2019.
- [36] T. Hales et al., A formal proof of the Kepler conjecture, *Forum of Mathematics, Pi*, Vol 5., 2017.
- [37] G. Nellis, S. Klein, *Heat Transfer*, Cambridge University Press, 2009.
- [38] R. Jacob, Techno-Economic Analysis of Phase Change Material Thermal Energy Storage Systems in High Temperature Concentrated Solar Power Plants, 2014 Asia-Pacific Solar Research Conference, 2014.,
- [39] R. Guedéz, Techno-economic performance evaluation of solar tower plants with integrated multi-layered CM thermocline thermal energy storage – A comparative study to conventional two-tank storage systems, *AIP Conference Proceedings* 1734, 2016.
- [40] S. Mohapatra et al., Thermophysical Properties of LiNO₃-NaNO₃-KNO₃ Mixtures for Use in Concentrated Solar Power, *Journal of Solar Energy Engineering*, 2013.
- [41] P. Tooklang et al., Thermal Distribution Performance of NPCM: NaCl, NaNO₃ and KNO₃ in the Thermal Storage System, *Energy and Power Engineering*, 2014.
- [42] B. D'Aguanno et al., Thermostatic properties of nitrate molten salts and their solar and eutectic mixtures, *Nature Research - Scientific reports*, 2018.
- [43] Y. Tian, C.Y. Zhao, A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, *Applied Energy*, 2013.
- [44] Chase, M.W., Jr., NIST-JANAF Thermochemical Tables, Fourth Edition, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998.

- [45] Ben Xu, Peiwen LI, Cholik Chan, Volume Sizing for Thermal Storage with Phase Change Material for Concentrated Solar Power Plant, Proceedings of the ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability, 2014.
- [46] A. R. Archibold et al., The effects of radiative heat transfer during the melting process of a high temperature phase change material confined in a spherical shell, Applied Energy, 2015.

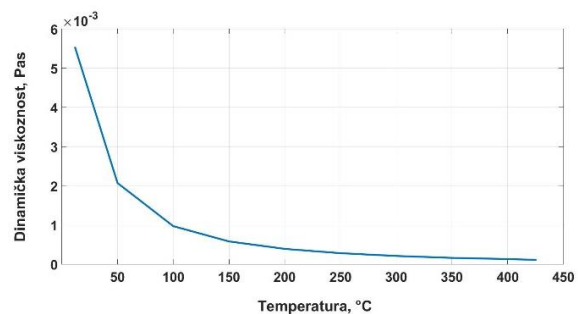
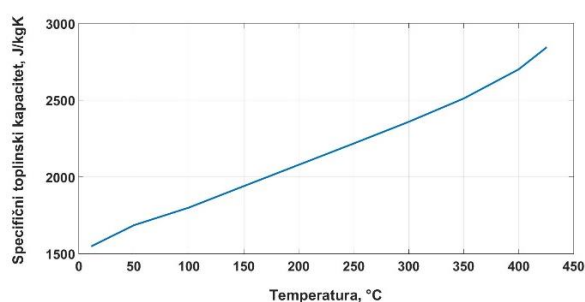
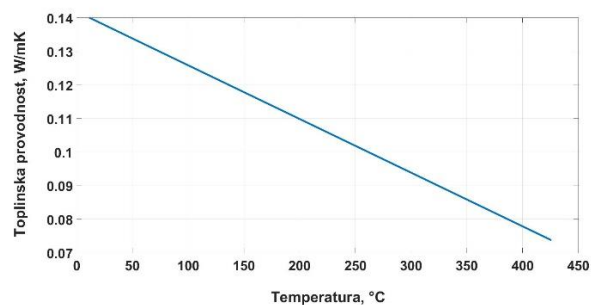
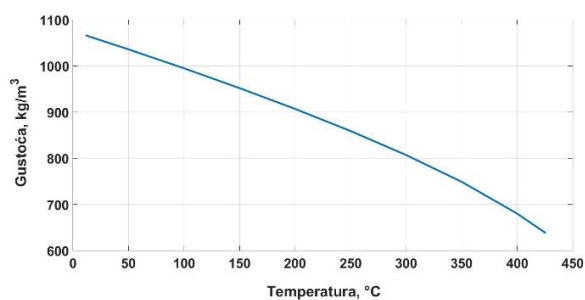
Prilog

Dodatni grafovi

Toplinski gubitci kolektora u ovisnosti o srednjoj temperaturi HTF-a u kolektoru:



Gustoća, toplinska provodnost, specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku i dinamička viskoznost HTF-a:



Konstante

Primjer Matlab skripte za $D_{\text{spremnik}} = 25 \text{ m}$, $d_{k,v} = 1 \text{ cm}$ i 80% KNO_3 + 20% KOH :

```
K1 = 2910.3
K2 = 0.45
K3 = 0.20973
K4 = 1
K5 = 0.85
K6 = 0.6234
K7 = 0.0809
K8 = 4.5615
K9 = 454007
K10 = 102024
KPTC,proj = 0.746;

T1 = 5
T2 = 70
T3 = 50
T4 = 50
T5 = 40
T6 = 50
T7 = 25
T9 = 5
T10 = 10

%%%%%Podaci o soli, KOH
rosolK = 2044; %kg/m3
Lsol = 149700; %J/kg latentna toplina
cpsolT = 1481; %J/kgK specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku,
za sol u tekućem stanju
cpsolK = 1402; %J/kgK specifični toplinski kapacitet pri konstantnom tlaku,
za sol u krutom stanju
Ttalj = 380; °C temperatura taljenja soli
htaljpoc = cpsolK * Ttalj; %J/kg entalpija soli na početku taljenja
htaljkraj = htaljpoc + Lsol; %J/kg entalpija soli na kraju taljenja
lambda = 0.5; %W/mK
alfa = 2013; % 1. koef. temp. eksp.
beta = 0.4396; % 1. koef. temp. eksp.

%%%%%Podaci o soli, KNO3 - za donjih 20% spremnika
rosolKdno = 2110; %kg/m3
Lsoldno = 226000; %J/kg latentna toplina
cpsolTdno = 1310; %J/kgK specifični toplinski kapacitet pri konstantnom
tlaku, za sol u tekućem stanju
cpsolKdno = 1140; %J/kgK specifični toplinski kapacitet pri konstantnom
tlaku, za sol u krutom stanju
Ttaljdno = 333; °C temperatura taljenja soli
htaljpocdno = cpsolKdno * Ttaljdno; %J/kg entalpija soli na početku taljenja
htaljkrajdno = htaljpocdno + Lsoldno; %J/kg entalpija soli na kraju taljenja
lambda = 0.5; %W/mK
alfadno = 2315; % 1. koef. temp. eksp.
betadno = 0.729; % 1. koef. temp. eksp.

%%%%%Dimenzije, masa, volumen i površina kapsule i njenih dijelova
rv = 0.005; %m
r4 = rv - 0.0005; %m
r3 = 0.004; %m
r2 = 0.0025; %m
```

```

r1 = 0.001; %m
rt1 = r1;
rt2 = (r1 + r2) / 2;
rt3 = (r2 + r3) / 2;
rt4 = (r3 + r4) / 2;

void = 0.2; %[-] udio praznine u kapsuli pri 330 °C
Vkapsunutar = 4/3 * r4^3 * pi; %m3 volumen untrašnjosti kapsule
Mksoli = rosolK * (1 - void) * Vkapsunutar; %kg masa soli u kapsuli,
računato pri 330 °C i praznini od 10% volumena kapsule
Mksolidno = rosolKdno * (1 - void) * Vkapsunutar; %kg masa soli u kapsuli,
računato pri 330 °C i praznini od 10% volumena kapsule

Au = 4 * pi * r4^2; %m2
Av = 4 * pi * rv^2; %m2
rocelik = 7850; %kg/m2
cpcelik = 461; %J/kgK
Ms = 4/3 * (rv^3 - r4^3) * pi * rocelik; %kg

Mk1 = 4/3 * r1^3 * pi * rosolK; %kg
Mk2 = 4/3 * (r2^3 - r1^3) * pi * rosolK; %kg
Mkldno = 4/3 * r1^3 * pi * rosolKdno; %kg
Mk2dno = 4/3 * (r2^3 - r1^3) * pi * rosolKdno; %kg

%V4 = 4/3 * (r4^3 - r3^3) * pi; %m3 volumen 4. sloja bez praznine
%M4 = V4 * rosolK; %kg masa 4. sloja bez praznine
V4kruto = 8.23888981247E-08; %m3 volumen 4. sloja s prazninom u krutom stanju
- podatak uvezen iz excel proračuna
M4void = rosolK * V4kruto; %kg masa 4. sloja s prazninom
M4voiddno = rosolKdno * V4kruto; %kg masa 4. sloja s prazninom

%V3 = 4/3 * (r3^3 - r2^3) * pi; %m3 volumen 3. sloja bez praznine
%M3 = V3 * rosolK; %kg masa 3. sloja bez praznine
V3kruto = 1.57524060854E-07; %m3 volumen 3. sloja s prazninom u krutom stanju
- podatak uvezen iz excel proračuna
M3void = rosolK * V3kruto; %kg masa sa prazninom
M3voiddno = rosolKdno * V3kruto; %kg masa sa prazninom

hkapsulapoc = 0.002584267; %m pocetna visina zraka u kapsuli - uvezeno iz
excela

rozr = 1.1884; %kg/m3 gustoća zraka pri 20 °C - kad se kapsula radila
Vvoidkruto = 7.63407014822E-08; %m3 volumen praznine u krutom stanju - excel
Mzr = rozr * Vvoidkruto; %kg masa zraka u kapsuli
cpzr = 1053.9; %J/kgK cp zraka pri 340 °C
Azr_4 = (r4^2 - r3^2) * pi; % m^2 površina izmjene topline između zraka i
4. sloja soli - konstantna vrijednost

%%%%%Spremnik
Vk = 4/3 * rv^3 * pi; %m3 volumen cijele kapsule
epsilon = 0.34; %[-] udio ulja u cilindričnom spremniku (poroznost spremnika)
Dspremnik = 25 %m odabrani promjer spremnika
DkrozH = 2; %[-] procjenjena vrijednost omjera promjera i visine spremnika
Hspremnik = Dspremnik / DkrozH %m visina spremnika
nslojeva = 10; %[-] broj proračunskih slojeva u spremniku
Hsloj = Hspremnik / nslojeva; %m visina jednog sloja
Vsloj = Dspremnik^2 * pi / 4 * Hsloj; %m3 volumen sloja
Vspremnik = nslojeva * Vsloj; %m3 sve jasno
n = Vspremnik * (1-epsilon) / Vk; %[-] broj kapsula u spremniku
nsloj = n / nslojeva; %[-] broj kapsula u jednom sloju

```

```
Vuljesloj = Vsloj - nsloj * Vk; %m3 volumen ulja u sloju
n_spremnika = 4 % broj paralelnih spremnika

%%%%Početne vrijednosti temperature ulja, stjenke i zraka [°C] i
%%%%entalpije soli [J/kg] po slojevima, uvezeno iz excela
Tpoc10 = 293; Tpoc9 = 300; Tpoc8 = 308; Tpoc7 = 320; Tpoc6 = 330;
Tpoc5 = 350; Tpoc4 = 380; Tpoc3 = 380; Tpoc2 = 380; Tpoc1 = 380;
hpoc10 = 336300; hpoc9 = 342000; hpoc8 = 431816; hpoc7 = 448640;
hpoc6 = 462660; hpoc5 = 490700; hpoc4 = 532760; hpoc3 = 532760;
hpoc2 = 532760; hpoc1 = 532760;

%%%%%alfe
alfau = 35; %W/m2K pretpostavljeni alfa s unutarnje strane kapsule
alfav_min = 30; %W/m2K srednji alfa s vanjske strane kapsule, prema ulju
k_alfa = 0.227394*(1-epsilon)^0.278 /
(epsilon*Dspremnik^1.444*(2*rv)^0.278); % koef za izračun alfe
alfazr = 20; %W/m2K alfa prema zraku u kapsuli
```