

# Matematički model dinamike procesa u spremniku latentne topline

---

**Vuger, Petar Krešimir**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2014**

*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:235:923130>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Petar Krešimir Vuger**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**MATEMATIČKI MODEL DINAMIKE  
PROCESA U SPREMNIKU LATENTNE  
TOPLINE**

Mentor:

Prof. dr. sc. Dražen Lončar, dipl. ing.

Student:

Petar Krešimir Vuger

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Draženu Lončaru.

Petar Krešimir Vuger



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Krešimir VUGER**

Mat. br.: 0035182438

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **MATEMATIČKI MODEL DINAMIKE PROCESA U SPREMNIKU LATENTNE TOPLINE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS DYNAMICS IN LATENT HEAT STORAGE**

Opis zadatka:

Spremnici latentne topline koriste se ne samo za rješavanje problema izravnavanja i produljenja pogona solarne termoelektrane nego i kao širokoprimjenjiv koncept skladištenja toplinske energije na različitim temperaturnim razinama. U okviru rada potrebno je:

1. Opisati aktualne izvedbe spremnika latentne topline;
2. Za konfiguraciju solarne termoelektrane električne snage 1 MW smještenu u Istri dimenzionirati spremnik latentne topline i potrebno povećanje kolektorskog polja dostatno za trosatno produljenje pogona;
3. Izvesti matematički model dinamike procesa u spremniku latentne topline;
4. Simulirati tjedni pogon solarne termoelektrane spregnute sa spremnikom u karakterističnim sezonskim uvjetima.

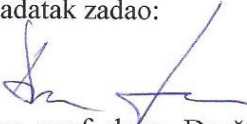
U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:  
11. studenog 2013.


Rok predaje rada:  
**1. rok:** 21. veljače 2014.  
**2. rok:** 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 3., 4. i 5. ožujka 2014.  
**2. rok:** 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr.sc. Dražen Lončar

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## Sadržaj:

Popis oznaka:.....	VI
Popis slika.....	VIII
Popis tablica.....	IX
Sažetak.....	X
1. Uvod.....	1
1.1. ORC ciklus na solarni pogon .....	1
2. Spremnici topline .....	3
2.1. Osjetni spremnici topline.....	4
2.2. Kemijski spremnici topline, [3] .....	9
2.3. Latentni spremnici topline i aktualne izvedbe .....	11
Mogućnosti poboljšanja .....	12
2.4. Spremnici topline u solarnim elektranama .....	15
3. Dimenzioniranje spremnika i povećanje kolektorskog polja .....	17
Potrebna veličina osjetnog spremnika .....	22
4. Matematički model latentnog spremnika topline.....	24
4.1. Bilance energije.....	26
4.2. Jednadžbe toplinskih tokova .....	28
5. Rezultati simulacije.....	30
5.1. Dnevni rad .....	30
5.2. Tjedni rad latentnog spremnika sa solarnom elektranom .....	39
5.2.1. Tjedni rad bez poremećaja.....	39
5.2.2. Tjedni rad s poremećajima .....	45
6. Zaključak .....	51
7. Dodatak.....	52
7.1. Matlab skripta.....	52
7.2. Simulink model .....	55
Literatura.....	57

## Popis oznaka:

$Q_{os}$	J	osjetna toplina
$Q$	J	ukupno dobivena toplina na kolektorima
$\Phi_K$	W	toplinski tok iz kolektorskog polja
$\Phi_s$	W	dozračeni toplinski tok sa Sunca
$\Phi_{us, j}$	W	toplinski tok ulje – stijenka
$\Phi_{sm, j}$	W	toplinski tok stijenka – segment 1
$\Phi_{m, jk}$	W	toplinski tok između segmenata PCM-a
$M$	kg	masa
$M_u$	kg	masa ulja
$M_s$	kg	masa stijenke
$M_m$	kg	masa PCM-a
$m_u$	kg/s	maseni tok ulja
$c$	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet
$c_{p, kr}$	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet krute faze
$c_{p, t}$	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet tekuće faze
$c_{pi}$	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet ulja
$c_j$	J/(kgK)	specifični toplinski kapacitet stijenke
$T$	K	temperatura
$r$	J/kg	latentna toplina
$h_2$	J/kg	entalpija taline PCM-a na kraju fazne pretvorbe
$h_1$	J/kg	entalpija krutine PCM-a na početku fazne pretvorbe
$h_{m, jk}$	J/kg	entalpija PCM-a
$n$	-	broj kolektorskih modula
$A_m$	m <sup>2</sup>	površina kolektorskog modula
$\eta$	-	iskoristivost modula
$\vartheta_t$	°C	temperatura taljenja
$\vartheta_1$	°C	temperatura krute faze
$\vartheta_2$	°C	temperatura tekuće faze
$\vartheta_{u, i}$	°C	temperatura ulja
$\vartheta_{s, j}$	°C	temperatura stijenke
$\vartheta_{m, jk}$	°C	temperatura PCM-a
$L$	m	duljina cijevi spremnika
$N$	-	broj cijevi spremnika
$d$	m	vanjski promjer cijevi
$D$	m	promjer referentne cijevi
$R_1$	m	unutarnji polumjer cijevi
$R_2$	m	vanjski polumjer cijevi
$R_3$	m	polumjer referentne cijevi
$\delta$	m	debljina segmenta s PCM-om

$\lambda$	W/(mK)	toplinska provodnost krutine PCM-a
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća PCM-a
$\lambda_s$	W/(mK)	toplinska provodnost stijenke cijevi
$\alpha_{un}$	W/(m <sup>2</sup> K)	koefcijent prijelaza topline za ulje
$\alpha_v$	W/(m <sup>2</sup> K)	koefcijent prijelaza topline za PCM



## Popis slika

Slika 1. Prikaz ORC s izopentanom kao radnom tvari [1] .....	2
Slika 2. Termoklinski osjetni spremnik s pregradama.....	5
Slika 3. Termoklinski spremnik s mješovitim medijem .....	6
Slika 4. Fotonaponski zrakomhlađeni moduli [17].....	6
Slika 5. Solarna termoelektrana s osjetnim spremnicima topline [3] .....	7
Slika 6. Solarna termoelektrana u Grenadi, Andasol [6] .....	9
Slika 7. Shematski prikaz rada termoelektrane s kemijskom pohranom .....	10
Slika 8. Metalna pjena veće poroznosti [10] .....	13
Slika 9. Metalna pjena manje poroznosti [11].....	13
Slika 10. Usporedba osjetnog i latentnog spremnika .....	14
Slika 11. Usporedba osjetnog i latentnog spremnika s više različitih PCM-a .....	14
Slika 12. Karakterističan profil zračenja [8] .....	18
Slika 13. Podjela referentne cijevi na odsječke.....	24
Slika 14. Podjela odsječka na segmente i dimenzije.....	25
Slika 15. Modelski prikaz za bilancu energije ogrjevnog fluida .....	26
Slika 16. Modelski prikaz za bilancu energije po segmentima .....	27
Slika 17. Promjena otopljene količine PCM-a tokom vremena po odsječcima .....	30
Slika 18. Temperatura ogrjevnog fluida po odsječcima .....	31
Slika 19. Detalj završetka rada spremnika .....	32
Slika 20. Promjena temperature PCM-a u prvom odsječku .....	32
Slika 21. Detalj s krivulje .....	33
Slika 22. Uvećani prikaz odnosa temperatura segmenata tokom punjenja .....	33
Slika 23. Uvećani prikaz odnosa temperatura segmenata tokom pražnjenja .....	34
Slika 24. Promjene temperature PCM-a u drugom odsječku .....	34
Slika 25. Detalj 1 .....	35
Slika 26. Detalj 2.....	35
Slika 27. Promjene temperatura PCM-a u trećem odsječku.....	36
Slika 28. Detalj A.....	36
Slika 29. Promjene temperatura PCM-a u četvrtom odsječku .....	37
Slika 30. Detalj A.....	37
Slika 31. Detalj B .....	38
Slika 32. Promjena toplinskog toka iz kolektora i iz spremnika topline .....	38
Slika 33. Količina otopljene mase PCM-a u vremenu.....	40
Slika 34. Promjena temperature ulja u vremenu .....	40
Slika 35. Detalj A.....	41
Slika 36. Detalj B .....	41
Slika 37. Promjena temperature PCM-a u prvom odsječku .....	42
Slika 38. Detalj A.....	42
Slika 39. Detalj B .....	43
Slika 40. Promjena temperature PCM-a u četvrtom odsječku .....	43
Slika 41. Promjena toplinskog toka iz kolektora i iz spremnika .....	44
Slika 42. Detalj A.....	44

Slika 43. Uvećani prikaz završetka korištenja spremnika .....	45
Slika 44. Promjena otopljene mase .....	46
Slika 45. Izlazna temperatura ulja .....	47
Slika 46. Temperature PCM-a u prvom odsječku .....	47
Slika 47. Temperature PCM-a u drugom odsječku .....	48
Slika 48. Temperature PCM-a u trećem odsječku .....	48
Slika 49. Temperature PCM-a u četvrtom odsječku .....	49
Slika 50. Profili zračenja u tjednom radu i izlazni toplinski tok iz spremnika .....	49
Slika 51. Prvi odsječak referentne cijevi .....	55
Slika 52. Povratna veza koja određuje protok ulja kroz referentnu cijev .....	56

## **Popis tablica**

Tablica 1. Materijali za pohranu osjetne topline [2], [4] .....	8
Tablica 2. Materijali za kemijsku pohranu energije [2], [4] .....	10
Tablica 3. Materijali za latentne spremnike topline [2], [12] .....	15
Tablica 4. Fizikalna svojstva natrijeva nitrita, $\text{NaNO}_2$ .....	19
Tablica 5. Rezultati dimenzioniranja spremnika .....	22
Tablica 6. Veličine osjetnih i latentnog spremnika .....	22
Tablica 7. Produljenje pogona .....	50

## Sažetak

Solarne termoelektrane na organski Rankineov ciklus, kao i fotonaponski članci i vjetroturbine imaju veliku nepouzdanost u radu, jer iako im je energent koji koriste besplatan, nepredvidiv je. Stoga se solarne elektrane za poboljšanje svoje pouzdanosti i produljenje rada nadograđuju sa spremnicima topline i time postaju puno prihvatljivije za rad u velikim energetske sustavima. U nastavku, razmatrat će se termodinamičke pojave u spremniku latentnom topline, dimenzionirat će se najjednostavnija izvedba spremnika koji će moći produljiti pogon postrojenja zadane solarne termoelektrane od 1 MW za tri sata i analizirat će se dinamika procesa u tako dobivenom spremniku te proučiti ponašanje latentnog spremnika na očekivane pogonske poremećaje.

# 1. Uvod

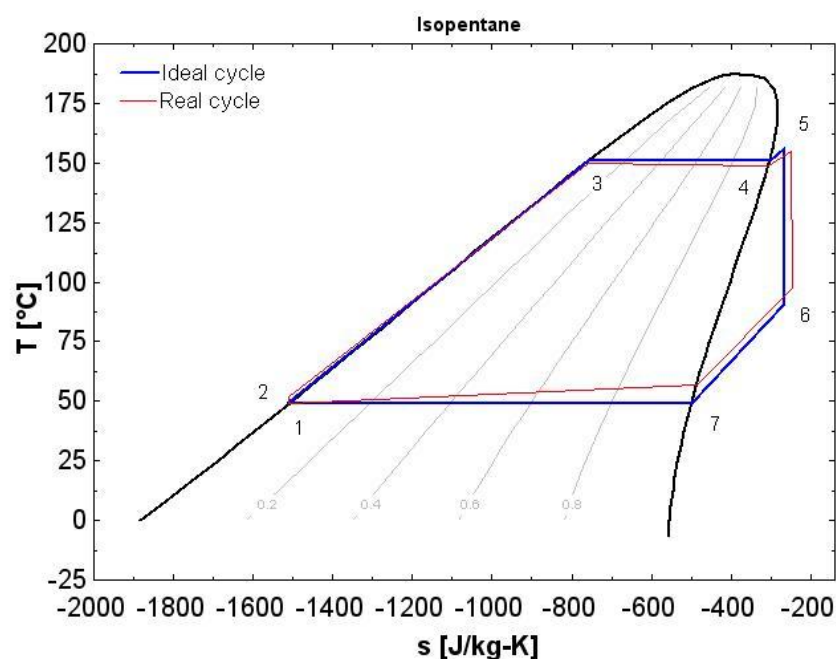
Od davnina je postojala ljudska potreba za skladištenjem energije kako bi se ona mogla koristiti za kasnije potrebe. U početku, ta potreba je bila vrlo jednostavna i može se reći primitivna jer se kroz povijest najviše bazirala na tome da se skupi dovoljno ogrjevnog drva za kuhanje i grijanje tokom hladnih dana. Tek se u 18. stoljeću u Švedskoj pojavila prva centralna priprema tople vode, a u Engleskoj prvi sustav parnog grijanja. Razvojem centralne pripreme vode došlo je do potrebe za njezinom akumulacijom tako da ona bude dostupna tokom cijelog dana neovisno o potrošnji. Time su se pojavili prvi osjetni toplinski spremnici tople vode. Do danas se tehnologija skladištenja topline nije bitno promijenila, ali je unaprijeđena jer se sada koriste bolji izolacijski materijali, upotrebljavaju se različite tvari za pohranu topline, metode pohrane topline su razvijenije. Veliki napredak je u primjeni spremnika topline te se oni danas ne koriste samo za akumulaciju tople potrošne vode, nego i za akumulaciju leda, skladištenje otpadne topline iz raznih industrija te za izravnavanje i produljenje rada termoelektrana. Kako su obnovljivi izvori energije postali izrazito popularni, ali i neki od njih vrlo korisni zbog jednostavnosti korištenja i primjene, spremnici topline su našli primjenu i kod njih. Sunčeva energija se kao obnovljivi izvor energije koristi dvojako, za izravnu proizvodnju električne energije pomoću fotonaponskih modula i za proizvodnju toplinske energije koja se do sada najviše koristila za potrebe grijanja tople vode i prostora. No, sunčeva toplinska energija se u zadnjih nekoliko desetaka godina počela koristiti i za proizvodnju električne energije u solarnim termoelektranama koje se grade na lokacijama s izrazito toplom klimom jer iako su takva postrojenja složenije izvedbe od fotonaponskih modula, zbog viših temperatura imaju bolju iskoristivost. Naime, solarnim termoelektranama odgovara vruća klima i nemaju probleme kao fotonaponski moduli kojima s porastom temperature modula iskoristivost opada. Solarne elektrane pak imaju nedostatak da rade samo s izravnim sunčevim zračenjem i moraju biti predimenzionirane kako bi mogle raditi i sa slabijim intenzitetom zračenja barem par sati dnevno. Stoga se je došlo do ideje da se taj višak topline, koji se uvijek stvara u solarnim kolektorima tokom sati najvećeg intenziteta zračenja, skladišti u spremnike topline za kasniju upotrebu, čime se produljuje pogon postrojenja elektrane te postaje otpornija na neočekivanu naoblaku. Solarne termoelektrane su u početku, kao i konvencionalne termoelektrane kao radni medij koristile vodu, no zbog visokih temperatura pare koje se postižu samo uz povećanje tlaka postrojenje je trebalo biti napravljeno s visokotlačnim cijevima, što znatno poskupljuje investiciju i kasnije održavanje te se je počelo istraživati s novim materijalima koji bi mogli poslužiti za prijenos topline iz kolektorskog polja do generatora i koji bi se umjesto vode mogli koristiti u kružnom procesu. Postrojenja s organskim Rankineovim ciklusom su proizašla kao rješenje te će se u ovom radu upravo jedno takvo postrojenje nadograditi s latentnim spremnikom topline.

## 1.1. ORC ciklus na solarni pogon

Organski Rankineov ciklus (ORC) radi na istom principu kao i klasičan Rankineov ciklus jedino što radna tvar nije voda nego neka organska tekućina visoke molekularne mase s faznom pretvorbom iz tekuće u plinovitu fazu na nižim temperaturama nego što je to kod vodeno parnog ciklusa. Takva postrojenja su prvenstveno namijenjena za mala postrojenja za

proizvodnju električne energije (do 5 MW) gdje su manje maksimalne temperature i temperaturne razlike kao npr. solarna energije, geotermalni izvori i otpadna toplina, tj. gdje bi klasičan vodeno parni ciklus bio neekonomičan i preskup zbog niskih parametara pare. Danas se koriste brojne organske tekućine, njih preko stotinu a neke od njih su:

- Toulon
- etanol
- metanol
- R113, R245fa, R236fa
- trans-buten, isobutan
- buten
- R12, R13, R22, itd.



Slika 1. Prikaz ORC s izopentanom kao radnom tvari [1]

ORC se primjenjuje u solarnim termoelektranama. Zbog pojeftinjenja postrojenja izbjegava se korištenje vode kao prijenosnog medija topline od solarnog polja do generatora pare što ima za posljedicu niže temperature ogrjevnog fluida. Naime, koristeći vodu kao ogrjevni fluid mogu se postići visoke temperature uz visoki tlak, no to zahtjeva skupe cjevovode. Da bi se pojeftinilo postrojenje odabiru se tekućine koje se pri okolišnom tlaku mogu zagrijati na puno više temperature, do oko 300 °C, no tada parni Rankineov ciklus ima malu iskoristivost. Zato se koristi ORC i time se dodatno pojednostavljuje postrojenje.

## 2. Spremnici topline

Spremnik topline je uređaj koji služi za (privremenu) pohranu topline na nekoj temperaturi ili temperaturnom nivou, za kasnije korištenje. Pohranjena toplinska energija može biti namjerno proizvedena toplina, jer ju je u nekom trenutku bilo jeftino proizvesti ili se samo sprema kao rezerva, može biti višak topline iz termoelektrane te se pohranjuje za produljenje pogona postrojenja ili za brži početak rada nakon gašenja postrojenja ili može biti neka otpadna toplina koju je šteta baciti u okoliš pa se pohranjuje. Ta pohranjena energija se kasnije može koristiti za zagrijavanje potrošne tople vode i za grijanje prostorija ili za proizvodnju električne energije. Također, pohranjivati se može i led, tj. mogu se pothlađivati određeni materijali koji se kasnije koriste kao toplinski ponori, a najčešća primjena takvih oblika spremnika je u rashladnim sustavima i prehrambenoj industriji. Sustav sa spremnikom topline daje veću sigurnost opskrbe energijom, smanjuje troškove pogona i broj ulaženja u rad. Ovisno o kakvom je postrojenju riječ postrojenje može raditi samo noću kada je električna energija jeftinija (kao npr. banke leda) i može biti dimenzionirano samo za prosječno opterećenje, dok vršna opterećenja pokriva spremnik topline i time se smanjuje potrebna veličina postrojenja te se omogućuje da radi češće pod jednakim opterećenjem u području maksimalne iskoristivosti. Do sada su se spremnici topline najviše koristili u kućanstvima (kao spremnici tople vode), no primjena im sve više raste u mnogim drugim područjima, pogotovo u solarnim termoelektranama, jer sa sadašnjom tehnologijom puno je jeftinije pohranjivati toplinu nego električnu energiju. Sunčevo zračenje je promjenljivo tokom dana te solarno polje nikada ne daje konstantni toplinski tok koji je potreban za stabilan rad generatora pare. Kako bi generator pare mogao normalno raditi što dulje tokom dana solarno polje često se predimenzionira i kod viših intenziteta zračenja akumulira se više topline nego što je potrebno za projektni rad generatora pare. Taj višak topline se ne može iskoristiti u generatoru pare pa se količina dobivene topline regulira tako što se višak baca u okoliš ili se određeni broj kolektora otklanja iz radnog položaja. Za iskorištavanje tog viška topline intuitivno se nameće ugradnja spremnika topline koji taj višak topline vraća postrojenju kada više nema dovoljnog toplinskog toka iz solarnog polja i time produljuje pogon i znatno povećava isplativost postrojenja.

Postoje tri načina skladištenja toplinske energije, a time i tri vrste spremnika koji se znatno razlikuju u izvedbi:

- Osjetni spremnici topline
- Kemijski spremnici topline
- Latentni spremnici topline

Koji tip spremnika će se koristiti ovisi o raspoloživom temperaturnom rasponu za pohranu i korištenja topline, kapacitetu spremnika, tj. veličini, gubicima topline iz spremnika, razdobljima punjenja i korištenja pohranjene energije te cijeni spremnika. Prilikom konstruiranja spremnika topline postoje tri glavna kriterija koja se moraju razmatrati, a to su: tehnički kriteriji, ekonomska isplativost ili kraće ekonomičnost i utjecaj na okoliš. Pod tehničke kriterije ubrajaju se visoki kapacitet pohrane toplinske energije i može se reći da je on najvažniji, zatim koeficijent prijelaza topline s tekućine za prijenos topline (tekućina koja

se ugrijava u solarnom kolektoru i prenosi toplinu u generator pare ili u spremnik topline) na materijal za pohranu topline, jer ne mora ista tvar služiti za pohranu i prijenos topline. Tehnički kriterij je često odlučujući kriterij prilikom konstruiranja ili nabave spremnika te cijena tada dolazi u drugi plan.

Materijal za pohranu topline treba imati dobru mehaničku i kemijsku postojanost, ne smije biti agresivan prema materijalu izmjenjivača topline ili prema fluidu za prijenos topline ukoliko dolaze u dodir i potrebna je potpuna reverzibilnost prilikom punjenja i pražnjenja spremnika, tj. materijal ne smije degradirati u tom temperaturnom intervalu tokom određenog broja ciklusa. Spremnik mora biti dobro izoliran i na izolacijske materijale otpada znatan dio cijene spremnika. Korištenje spremnika mora biti jednostavno i po mogućnosti automatizirano da bi se moglo brzo odgovoriti na promjene u toplinskom toku sustava. Kod razmatranja ekonomičnosti želi se postići što niža cijena cijelog proizvoda. Pritom, troškovi pohrane toplinske energije trebaju biti što niži, a misli se na pogonske troškove i općenito investiciju potrebnu za taj dodatni sustav. Od materijala za izradu spremnika i materijala za pohranu topline očekuje se što niža cijena i dostupnost. Već je navedeno da je toplinski kapacitet spremnika jedan od presuđujućih faktora, jer o njemu ovisi veličina spremnika i što je on veći to će biti potrebno manje prostora te će troškovi vezani uz cijenu zemljišta biti manji. Utjecaj spremnika na okoliš mora biti što manji. Pritom se misli na tvari za pohranu topline koje mogu biti otrovne i štetne za okoliš, a i zapaljive. Ako su tvari opasne za okoliš potrebni su sustavi zaštite ukoliko dođe do oštećenja spremnika, kao npr. sigurnosni bazeni, protupožarna zaštita itd.

Spremnici topline se sve više koriste u kombinaciji s obnovljivim izvorima energije, a to će se i u ovom radu razmatrati, pa utjecaj cijelog sustava na okoliš mora biti minimalan, jer inače gubi svoj smisao.

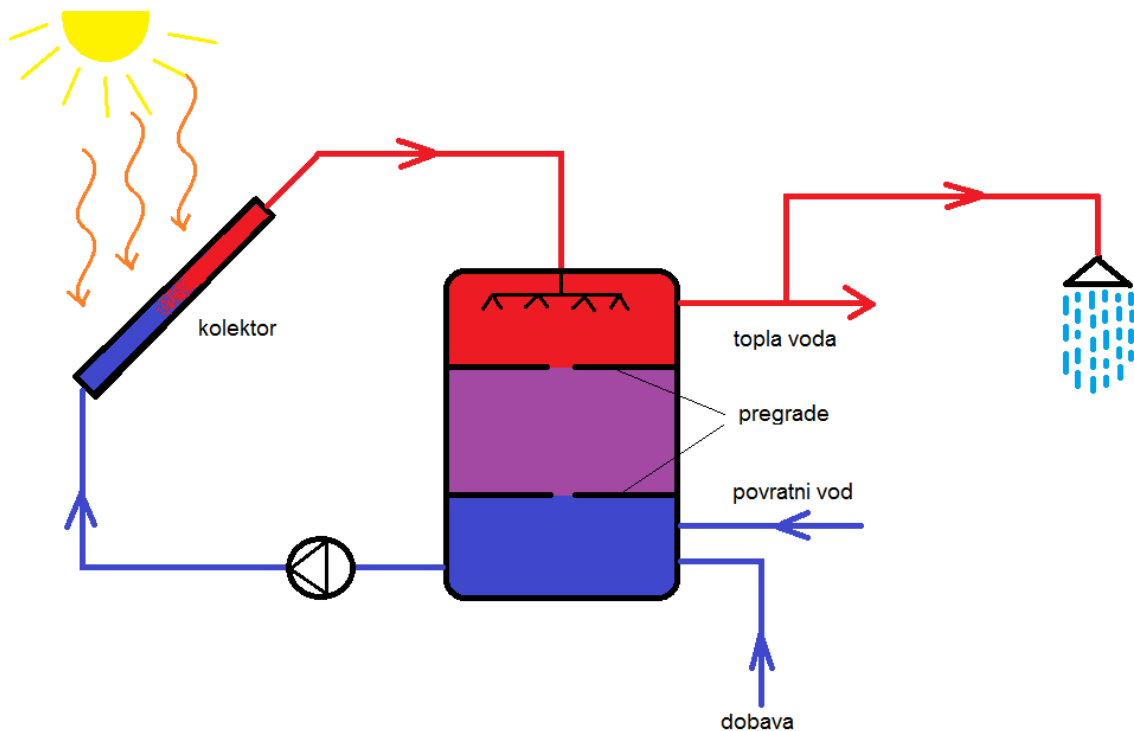
## 2.1. Osjetni spremnici topline

U osjetnim spremnicima topline energija se pohranjuje u materijal za pohranu topline koji može biti kruti ili tekući, u obliku njegove unutarnje energije, bez promjene agregatnog stanja. Količina pohranjene energije proporcionalna je promjeni temperature i može se izračunati iz izraza:

$$Q_{os} = M * c * \Delta T \quad (1.1)$$

Iz gornjeg izraza se već vidi prva mana ovih spremnika, a to je da prilikom pražnjenja ne mogu davati toplinu pri konstantnoj temperaturi već temperatura postepeno pada. Da bi se ta mana smanjila potrebno je odabrati tvar za pohranu topline s većim toplinskim kapacitetom ili koristiti veću količinu tvari, ali time se povećavaju dimenzije spremnika te su stoga ovi spremnici najveći. Iako zauzimaju najviše prostora relativno su jednostavne izvedbe i koriste materijale za pohranu topline koji su lako dostupni i jeftini. Osjetne spremnike topline možemo podijeliti s obzirom na izvedbu spremnika i s obzirom na materijale koji se koriste i podjele se međusobno nadopunjuju. Ukoliko se koristi jedan spremnik onda su to

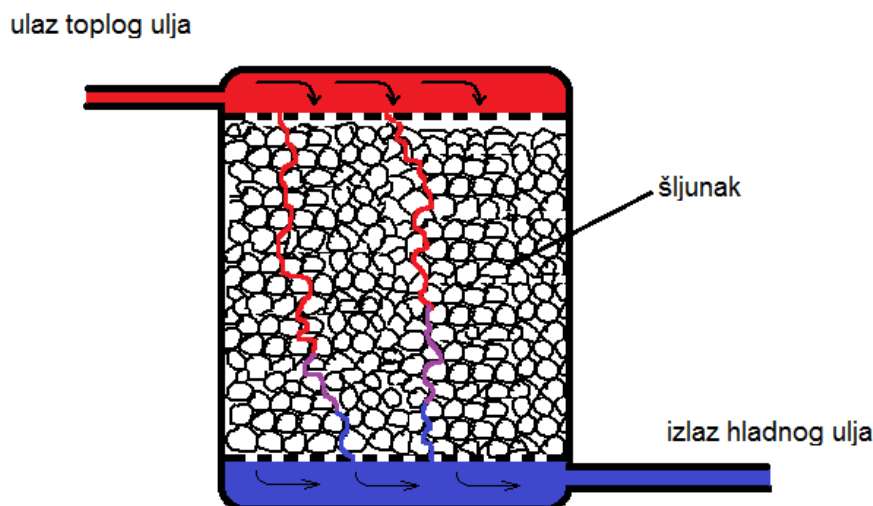
termoklinski osjetni spremnik topline s jednim medijem i s mješovitim medijem. U prvom slučaju tekućina za prijenos topline je ujedno i medij za pohranu topline i radi na principu da se iz spremnika s donje strane uzima hladni fluid koji se vodi u solarni kolektor (no može se voditi i u izmjenjivač topline ili u ložište, ovisno o kakvom se sustavu radi, ali u ovom će se radu spremnike topline prvenstveno vezati uz solarne sustave) gdje se ugrijava, a zatim se vraća u spremnik, ali s gornje strane jer tada ima manju gustoću i pluta iznad hladnog sloja.



Slika 2. Termoklinski osjetni spremnik s pregradama

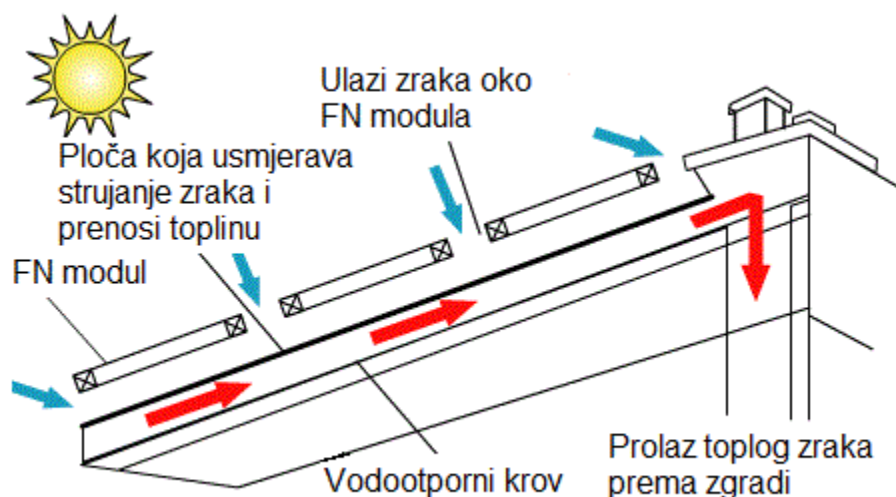
Važno je da brzine ulaznja i izlaznja vode ne budu velike tako da prisilno miješanje bude što manje i tako održi topli fluid pri vrhu što omogućuje njegovo korištenje iako cijeli spremnik nije na istoj temperaturi. Također u spremnik se ugrađuju i pregrade koje dodatno usporavaju miješanje fluida (slika 2). Tekućine koje se koriste su voda zbog velikog toplinskog kapaciteta, no ograničenje joj je temperatura vrenja, zato se koriste mješavine vode i etilen glikola, jer je to jeftinije od korištenja velikih visokotlačnih spremnika. Za još više temperature koriste se visokotemperaturna ulja, ali ona su skupa pa se zato upotrebljavaju u drugoj vrsti spremnika s mješovitim medijem. Korištenjem ulja se smanjuju troškovi visokotlačnih cjevovoda koji su potrebni kod osjetnih spremnika s vodom, ako se želi koristiti voda na temperaturama iznad 100 °C, a količina potrebnog skupog ulja se smanjuje tako što se u spremnik stavlja jeftini kruti medij za akumuliranje topline. Ulje u spremniku prolazi kroz slojeve kamena i šljunka, koji služi za popunjavanje rupa ili kroz slojeve nekih metala. Radi na istom principu kao i termoklinski osjetni spremnik s jednim medijem samo što ima kruti medij u spremniku.





Slika 3. Termoklinski spremnik s mješovitim medijem

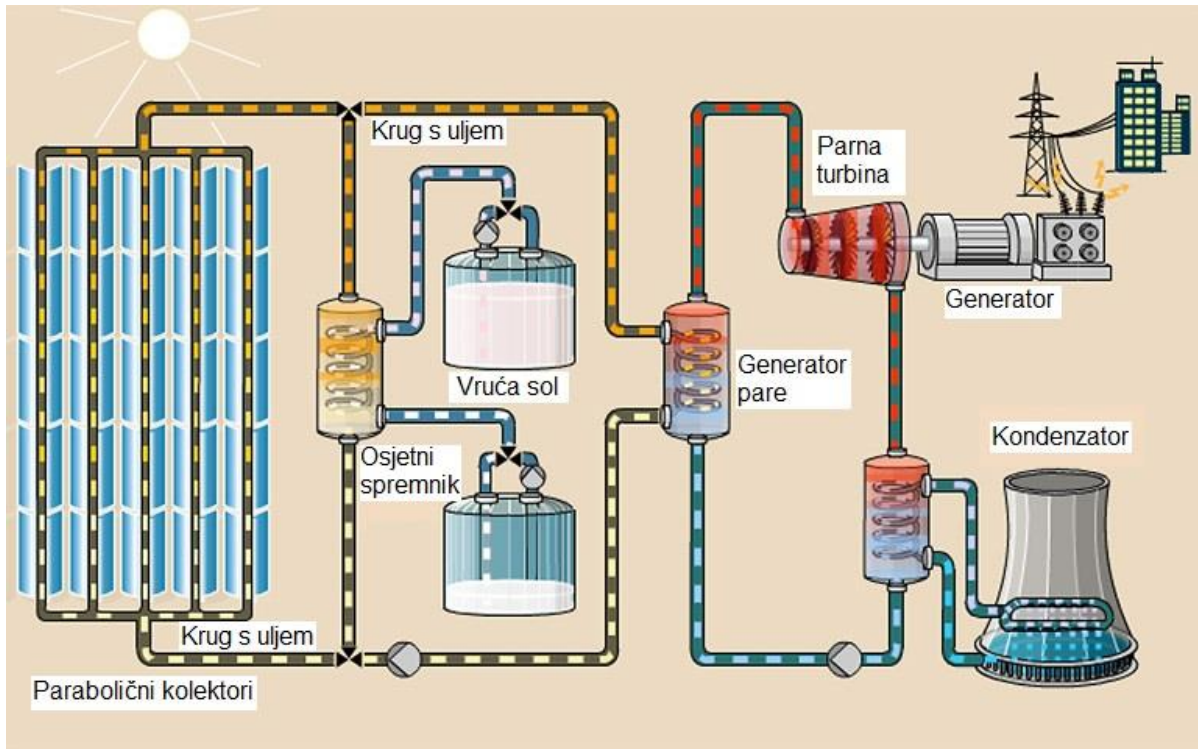
Termoklinski osjetni spremnik s mješovitim medijem može umjesto ulja koristiti i zrak za prijenos topline. Tada se ne koriste solarni kolektori već solarne ćelije s prolazima za zrak [2]. Zrak prolazi kroz ugrijanu solarnu ćeliju hladeći ju i poboljšavajući njenu iskoristivost, jer im iskoristivost pada s porastom temperature plohe. Ugrijani zrak odlazi u spremnik gdje struji kroz sloj šljunka i pijeska. Akumulirana toplina može se koristiti za grijanje prostora ili dobivanje potrošne tople vode.



Slika 4. Fotonaponski zrakomhlađeni moduli [17]

Osjetni spremnici s više spremnika su priključeni na sustav preko izmjenjivača topline. Obično su dva spremnika gdje je prvi za topli fluid, a drugi za hladni fluid. Prilikom punjenja hladni fluid struji kroz izmjenjivač gdje se ugrijava i odlazi u drugi spremnik, a prilikom pražnjenja je obrnuto. Za visoke temperature koriste se spremnici s posebnim tekućinama ili s rastaljenim solima. Rastaljene soli moraju se cijelo vrijeme držati rastaljenima, jer su na

okolišnoj temperaturi krutine, što predstavlja problem jer se moraju ugrađivati grijači i trošiti energija. Za najviše temperature koriste se kruti materijali za pohranu topline kao silikatne i magnezitne opeke ili rastaljeni metali, no oni se mogu koristiti samo u solarnim tornjevima i solarnim tanjurima, elektranama koje koncentriraju svjetlost na malu površinu i postižu visoke temperature.



Slika 5. Solarna termoelektrana s osjetnim spremnicima topline [3]

Tablica 1. Materijali za pohranu osjetne topline [2], [4]

Materijali za pohranu	Raspon radnih temperatura [°C]	Toplinska provodnost, $\lambda$ , [W/(mK)]	Gustoća, $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	Prosječni specifični toplinski kapacitet, $c_p$ , [kJ/(kgK)]	Volumenski toplinski kapacitet, [kWh/m <sup>3</sup> ]
pijesak - kamen - ulje	200 – 300	1	1700	1,3	60
armirani beton	200 – 400	1,5	2200	0,85	100
lijevano željezo	200 – 400	37	7200	0,56	160
natrijev klorid, NaCl	200 – 500	7	2160	0,85	150
lijevani čelik	200 – 700	40	7800	0,6	450
silikatna opeka	200 – 700	1,5	1820	1	150
magnezitna opeka	200 – 1200	5	3000	1,15	600
Tekućine					
sintetičko ulje	250 – 350	0,11	900	2,3	57
nitritne soli	250 – 450	0,57	1825	1,5	152
tekući natrij	270 – 530	71	853	1,3	80
silikonska ulja	300 – 400	0,1	900	2,1	52
tekuća litijeva sol	180 – 1300	38,1	510	4,19	-
Dowtherm A	15 – 400	0,1171 (155 °C)	867	2,2	-
Therminol 66	0 – 345	-	750	2,1	-
NaNO <sub>3</sub> – KNO <sub>3</sub> (60-40)	260 – 550	-	1861	1,53	-

Medij se odabire ovisno o temperaturnom nivou. Poželjniji su gušći mediji sa što većim toplinskim kapacitetom i toplinskom provodnosti. Kod krutih medija bitno je da su porozni ili da spremnik ima dovoljno prolaza za tekući medij. Ulja s vremenom degradiraju, a kod nekih soli postoji problem s korozijom. Zato se danas gdje je god to moguće koristi kao medij voda jer ima visok toplinski kapacitet i odličan koeficijent prolaza topline, a s vremenom ne mijenja svojstva.

Veličina osjetnih spremnika se kreće od desetak litara za kućnu upotrebu pa sve do nekoliko tisuća litara za energetska postrojenja. Spremnici su od čelika ili beton, dobro izolirani najčešće sa staklenom vunom ili poliuretanom u debljini od 10 do 20 cm što čini značajan trošak u ukupnoj cijeni spremnika [5].

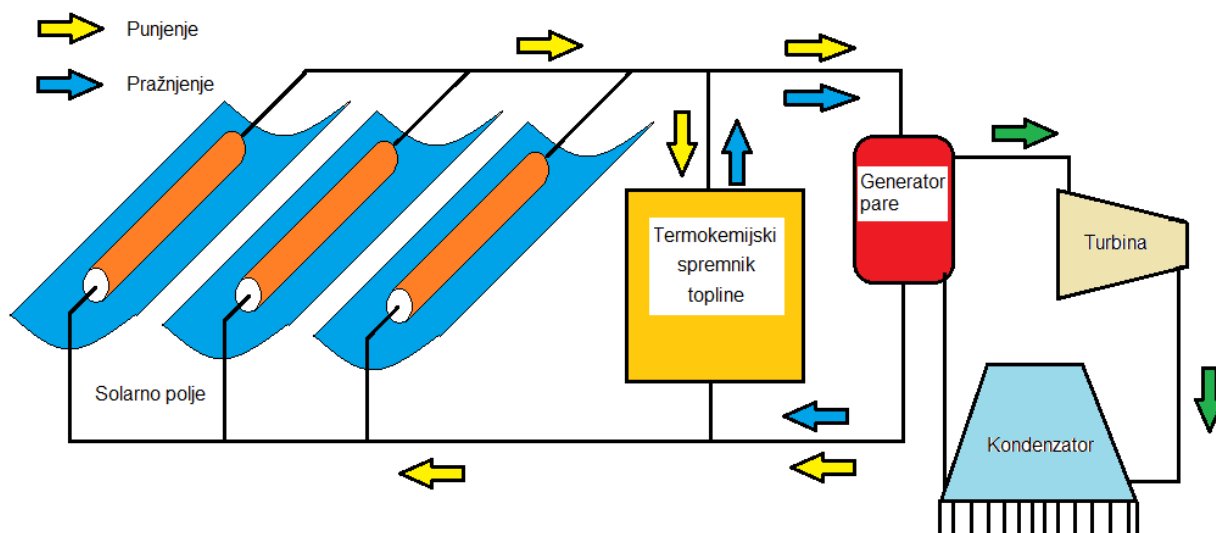


Slika 6. Solarna termoelektrana u Grenadi, Andasol [6]

Na slici 6 prikazana je solarna termoelektrana u Španjolskoj. U prvom planu su dva velika osjetna spremnika s indirektnom pohranom u kojima je otopljena sol. Jedan spremnik služi za pohranu tople soli, a drugi za hladnu. U opisu elektrane stoji da su spremnici topline dimenzionirani za produljenje pogona od 7,5 sati, a za to je potrebno 30 000 tona otopljene soli. Iza njih se vidi kolektorsko polje napraveljno od protočnih paraboličnih kolektora.

## 2.2. Kemijski spremnici topline, [3]

Toplina se u ovim spremnicima pohranjuje u obliku energije reverzibilnih kemijskih reakcija. Termokemijski proces skladištenja ima tri koraka. Prvi korak procesa je katalitička endotermna reakcija reaktanata koja se odvija zbog dovođenja energije koja se želi pohraniti. Drugi korak je spremanje produkata. Treći korak je pražnjenje spremnika oslobađanjem energije katalitičkom egzotermnom reakcijom. Materijali mogu biti organski ili anorganski samo je potrebno da njihova reverzibilna kemijska reakcija oslobađa, odnosno troši toplinu. Prilikom njihovog konstruiranja potrebno je razmotriti tri kriterija: odlična kemijska reverzibilnost, visoka pohrana energije, tj. veliki entalpijski pad i reakcija treba biti što jednostavnija.



Slika 7. Shematski prikaz rada termoelektrane s kemijskom pohranom

Tablica 2. Materijali za kemijsku pohranu energije [2], [4]

Materijali	Raspon radnih temperatura [°C]	Promjena entalpije prilikom kemijske reakcije [GJ/m <sup>3</sup> ]	Kemijska reakcija
željezov karbonat (siderit)	180	2,6	$\text{FeCO}_3 \leftrightarrow \text{FeO} + \text{CO}_2$
metanol	200 - 250	-	$\text{CH}_3\text{OH} \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$
metalni hidridi	200 - 300	4	$(\text{metal}_x\text{H}_2) \leftrightarrow \text{metal}_y\text{H}_2 + (x-y)\text{H}_2$
magnezijev oksid	250 - 400	3,3	$\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$
amonijak	400 - 500	67 kJ/mol	$\text{NH}_3 + \Delta\text{H} \leftrightarrow 1/2\text{N}_2 + 3/2\text{H}_2$
kalcijev hidroksid	500	3	$\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
magnezijev oksid	530	42 kJ/mol	$\text{MnO}_2 \leftrightarrow 0,5\text{Mn}_2\text{O}_3 + 0,25 \text{O}_2$
metan - voda	500 -1000	-	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$
kalcijev karbonat	800 - 900	4,4	$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$

Načelno, rad osjetnog i kemijskog spremnika u solarnoj elektrani se razlikuje samo u različitosti načina akumuliranja topline u spremniku, ali načela pražnjenja i punjenja su isti.

Iako vrlo zanimljiv, ovakav način akumuliranja topline još nije u primjeni.

### 2.3. Latentni spremnici topline i aktualne izvedbe

Latentni spremnici topline rade na principu topline pretvorbe [7]. Prijelaz realne tvari iz jednog u drugo agregatno stanje uvijek se odvija uz izmjenu topline, a što se tiče same radne tvari, to je povrativ ravnotežni proces koji se može odvijati u oba smjera, ovisno dovodi li se ili odvodi toplina. Specifična toplina pretvorbe,  $r$ , je razlika između entalpije faze manje gustoće i entalpije faze veće gustoće:

$$r = h_2 - h_1 \quad (2.1)$$

Ukoliko se proces odvija pri konstantno tlaku može se napisati sljedeća relacija:

$$r = \varphi + \psi = (u_2 - u_1) + p(v_2 - v_1) \quad (2.2)$$

Iz kojeg se vidi da se specifična toplina pretvorbe sastoji od promjene specifične unutrašnje energije  $\varphi$ , za koju se troši najviše topline jer se pritom kidaju međumolekularne veze starog agregatnog stanja, tj. toplina se troši za strukturne promjene tvari prijelazom u novo agregatno stanje. Na primjer ako se radi o otapanju leda tada se dovedena toplina, tj. energija troši na kidanje pravilno usmjerenih vodikovih veza između molekula vode i na udaljavanje molekula vode. Pritom se ne gube vodikove veze, kao kod isparavanja nego one postaju drugačije raspoređene tako da omogućuju veću pokretljivost molekula vode, ali za tako novi razmještaj je bilo potrebno uložiti toplinu. Ostatak topline  $\psi$  predstavlja obavljeni specifični mehanički rad s okolišem zbog promjene obujma pri promjeni agregatnog stanja i obično je to mali iznos. Za faznu pretvorbu potrebno je puno topline pa latentni spremnici imaju znatno veću gustoću pohrane topline naspram osjetnih spremnika, ali je zato potreban izmjenjivač topline i fluid za prijenos topline od izvora topline do spremnika. Kod primjene ovih spremnika koristi se pretvorba iz krutog u tekuće agregatno stanje, a vrlo rijetko iz tekućeg u plinovito zbog znatnog porasta volumena prilikom takve promjene, što predstavlja problem s obzirom na potreban veliki obujam za ekspanziju ili debelu stijenkiju koja će moći izdržati porast tlaka. Prednost spremnika latentne topline je što se fazna pretvorba odvija pri određenoj temperaturi ili u vrlo uskom rasponu, što je poželjno sa stajališta proizvodnje električne energije jer potrebni toplinski tok treba biti unutar određenog temperaturnog intervala kako bi se omogućio prijenos topline. Kod osjetnih spremnika nema izotermne pretvorbe pa se oni moraju zagrijavati na puno više temperature da bi mogli davati toplinski tok uz odgovarajuću temperaturnu razliku ili spremnik treba biti veći. Zato latentni spremnici mogu raditi i u sustavima s nižim parametrima fluida za prijenos topline što je poželjno jer tada postoji veći izbor takvih fluida.

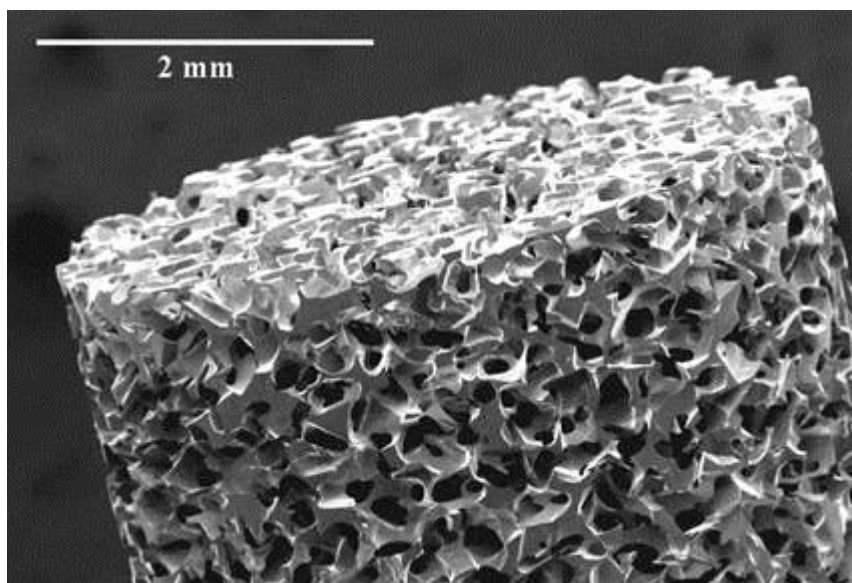
Klasičan primjer latentnog spremnika topline koji je već dulje vrijeme u upotrebi su banke leda. Koriste se u sustavima klimatizacije za hlađenje zraka. Tokom noći dok je električna energija jeftinije tarife, rashladni uređaj hladi najčešće smjesu vode i glikola te u latentnom spremniku preko izmjenjivača topline hladi vodu i stvara led. Po danu tokom skuplje tarife električne energije rashladni uređaj ne radi već se potrebni rashladni učinak dobiva od latentnog spremnika. Takav klimatizacijski sustav je jeftiniji za vođenje, smanjuje dnevnu potražnju za električnom energijom i ima puno veći kapacitet, jer u slučaju potrebe rashladni uređaj i spremnik mogu raditi istovremeno. Takva smanjenja vršnih opterećenja su

izrazito povoljna za cjelokupni energetski sustav jer se smanjuju potrebe za dodatnom opremom koja će pokrivati ta opterećenja kao plinske rezervne elektrane, dodatne transformatorske stanice itd.

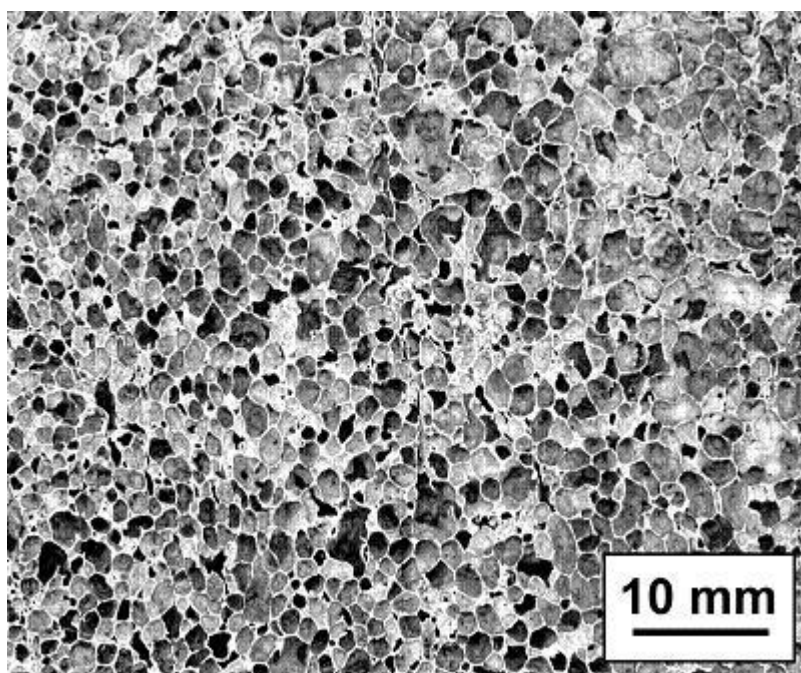
Postoji veliki izbor tvari za latentne spremnike topline i najčešće se rangiraju po temperaturi fazne pretvorbe te se raspon temperatura kreće od 0 °C do 897 °C. Te tvari su različite mješavine anorganskih soli s vodom, anorganske soli širokog raspona temperature taljenja, parafini za niže temperature te eutektične smjese određenih soli. U ovom radu se bavi solarnom elektranom na organski Rankineov ciklus (ORC) [8] u kojoj je radna temperatura zadana pa se izbor materijala s faznom pretvorbom znatno sužuje. Latentni spremnici imaju veliku gustoću pohrane energije no obično tvari koje se koriste imaju malu toplinsku provodnost što predstavlja glavni problem ovih spremnika. Prilikom punjenja spremnika, koji je ujedno i izmjenjivač topline, glavni oblik prijenosa topline je prirodna konvekcija  $\alpha$  [9] i ukupni koeficijent prolaza topline  $k$  je prihvatljiv te se punjenje odvija prihvatljivom brzinom. Prilikom pražnjenja spremnika glavni oblik prijenosa topline je provođenje jer se tvar za pohranu topline počinje skrtnjivati na cijevi koja je tada hladnija i nastaje sloj krutine koja ima nisku toplinsku provodnost  $\lambda$  pa ukupni koeficijent prolaza topline  $k$  je niski i toplina se sporo prenosi iz unutrašnjosti na fluid za prijenos topline. Prijenos topline postaje sve slabiji pa se za održavanje potrebnog toplinskog toka treba povećati površina za izmjenu topline. Ako je spremnik tipa cijev u cijevi tada se površina za prijenos topline može povećati smanjenjem razmaka između cijevi i povećanjem broja cijevi ili njihovim produljivanjem. To znatno povećava masu spremnika i podiže mu cijenu stoga se pokušava raznim metodama učinkovitije povećati površina za prijenos topline ili koeficijent prolaza topline.

## **Mogućnosti poboljšanja**

Kako bi se skratilo vrijeme punjenja, a pogotovo pražnjenja spremnika, oni se izrađuju s različitim poboljšanjima za prolaz topline, a traže se i kombinacije materijala koje će imati bolju toplinsku provodnost. Da bi se poboljšao prolaz topline cijevi se u spremniku orebruju s uzdužnim ili poprečnim rebrima, koja su od istog materijala kao i cijev ili od materijala s visokom toplinskom provodnosti kao bakar (koji je skup pa se baš ne koristi) ili aluminij ili ugljična vlakna, ali tada rebra nisu kruta i drukčije se postavljaju [2]. Postoje izvedbe, no još uvijek eksperimentalne, kod kojih se unutrašnjost spremnika ispunjava metalnom pjenom, a šupljine su ispunjene materijalom s faznom pretvorbom.



Slika 8. Metalna pjena veće poroznosti [10]



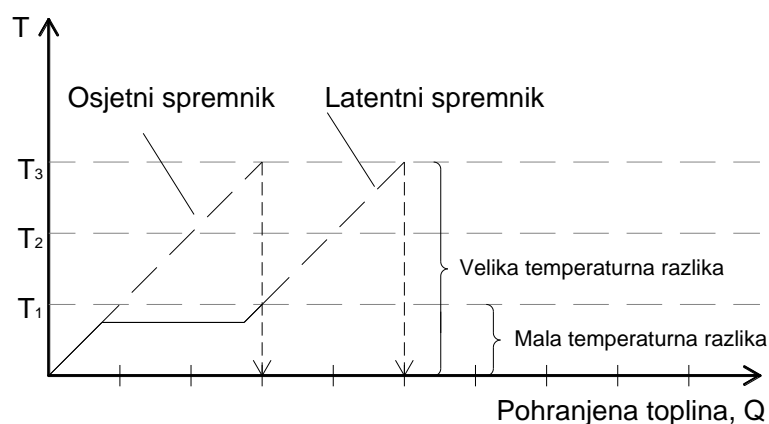
Slika 9. Metalna pjena manje poroznosti [11]

Metalne pjene imaju poroznost od 85% do 97% i relativno visoku toplinsku provodnost. Takva izvedba znatno poboljšava prolaz topline, iako predstavlja visoki otpor strujanju pa prirodne konvekcije skoro i nema. Problem predstavlja dobivanje metalnih pjena, jer tehnologija još nije usavršena i relativno je skupa. Istražuje se koliko ugljična vlakna pomiješana s materijalom za pohranu topline ubrzavaju procese izmjene topline. Kombinacije s parafinom se najviše istražuju i rezultati pokazuju da već 10% ugljičnih vlakana daje vidljivo poboljšanje. No takve kombinacije zbog niske temperature fazne pretvorbe parafina se ne koriste u solarnim elektranama za proizvodnju električne energije.

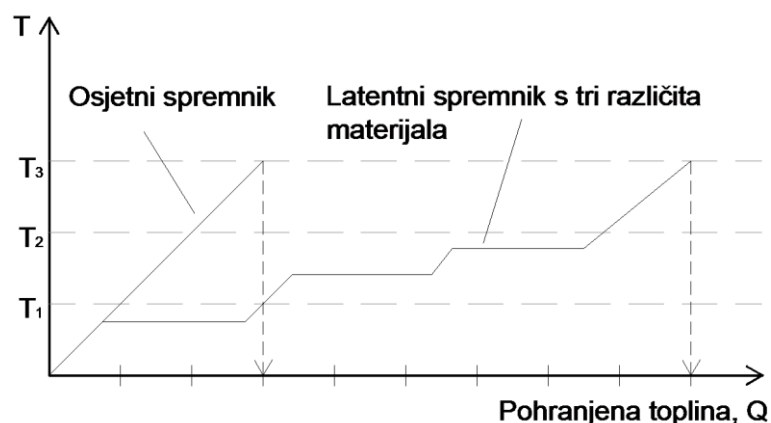


Izvedbe cijevi s termosifonima imaju istu funkciju kao i orebrenje cijevi, a to je da smanje potreban broj cijevi i omoguće veću debljinu PCM-a oko cijevi. Intenzivno se istražuju mogućnosti takvih cijevi jer znatno više pridonose povećanju koeficijenta prolaza topline nego lamele. Njihov nedostatak je što dobro rade samo pod određenim uvjetima, samo kada je određeni dio termosifona uronjen u tekuću fazu. Radna karakteristika im opada s porastom debljine skrtnute faze na njihovoj stijenci.

Glavna prednost latentnih spremnika u odnosu na osjetne spremnike je što mogu pohraniti puno više topline ukoliko je toplina ogrjevnog fluida nešto viša od temperature fazne pretvorbe.



Slika 10. Usporedba osjetnog i latentnog spremnika



Slika 11. Usporedba osjetnog i latentnog spremnika s više različitih PCM-a

Omjer pada kako se povisuje temperaturna razlika dovođenja topline i osjetni spremnici zbog niže investicije postaju bolji izbor. Taj se problem kod latentnih spremnika topline rješava s kaskadnom pohranom. Kombinacijom više različitih materijala s različitim temperaturama fazne pretvorbe pohranjuje se znatno više topline nego samo s jednim

materijalom. Tako omjer pohranjene topline između latentnog i osjetnog spremnika postaje opet veliki. Toplina se ne pohranjuje samo kao latentna nego kao i osjetna svakog materijala koji je promijenio fazu pa se u konačnici dobiva još veća gustoća pohrane topline.

Veliki je izbor materijala za latentne spremnike topline, sa širokim rasponom temperatura i ovdje će se navesti oni koji su zanimljivi za uporabu u solarnim elektranama s ORC.

Tablica 3. Materijali za latentne spremnike topline [2], [12]

Materijal	Temperatura fazne pretvorbe [°C]	Gustoća, $\rho$ , [kg/m <sup>3</sup> ]	Toplinska provodnost, $\lambda$ , [W/(mK)]	Latentna toplina, $r$ , [kJ/kg]
E117 (anorganski)	117	1450	0,7	169
68,1% KCl + 31,9% ZnCl <sub>2</sub>	235	2480	-	198
NaNO <sub>2</sub>	271	2168	1	212
NaOH/Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (7,2%)	283			340
NaCl/NaNO <sub>3</sub> (5,0%)	284			171
KNO <sub>3</sub> (10%)/NaNO <sub>3</sub>	290			170
NaNO <sub>3</sub>	307	2260	0,5	172
NaOH	318	2130		158
KNO <sub>3</sub>	333	2110	0,5	226
KOH	380	2044	0,5	149,7
45,5% MgCl <sub>2</sub> – 21,6% KCl – 33% NaCl	380	2044	0,5	149,7
38,5% MgCl + 61,5% NaCl	435	2160	-	328
sol – keramika NaCO <sub>3</sub> – BaCO <sub>3</sub> /MgO	500 - 850	2600	5	415,4

## 2.4. Spremnici topline u solarnim elektranama

U solarnim termoelektranama danas se najviše koriste osjetni spremnici topline s tekućim solima te najčešće korištena mješavina soli je NaNO<sub>3</sub> – KNO<sub>3</sub> (60%, 40%). To su veliki spremnici koji mogu pohraniti topline za nekoliko sati rada elektrane i koriste se uglavnom izvedbe s dva spremnika. Postoji veliki broj takvih spremnika u funkciji u sklopu solarnih elektrana, a najviše ih se nalazi u Španjolskoj, zatim nešto u Americi, a u ostatku svijeta još nekoliko koji više služe za eksperimentalne svrhe.

Neki primjeri iz Španjolske su: Andasol solar power station u Granadi, 150 MW, 7,5 sati pohrane topline u 2 spremnika sa rastaljenom soli (60 % natrijev nitrati i 40 % kalijev nitrat); Aste solar power station u Alcázar de San Juan, 100 MW, 8 sati pohrane, 2 spremnika sa istim solima itd.

Razvojni tijek spremnika topline u solarnim elektranama teži pojeftinjenju pohrane i povećanju kapaciteta:

- Dva spremnika s izravnom pohranom
- Dva spremnika s posrednom pohranom
- Termoklinski spremnik
- Latentni spremnik te kemijski, koji je još samo u eksperimentalnoj fazi

Prva solarna elektrana s dva spremnika s izravnom pohranom je „Solar Energy Generating System I“ u Kaliforniji, sintetičko ulje je služilo i kao fluid za prijenos topline i kao tvar za pohranu topline. Ulje iz toplog spremnika ide u generator pare gdje stvara paru i ohlađeno odlazi u hladni spremnik iz kojeg se kasnije može vratiti u sustav, tj. natrag u kolektore na zagrijavanje. Takva izvedba nema izmjenjivač topline, a zbog dva spremnika se uklanja mana osjetnih spremnika da prilikom pražnjenja opada temperatura spremnika, tj. ulazna temperatura ogrjevnog fluida u generator pare što uzrokuje sniženje parametara parnog procesa. „The Solar Two“ je solarni toranj koji radi na istom principu ali umjesto ulja kao fluid za prijenos topline služi smjesa otopljenih soli što omogućava više temperature procesa.

Dva spremnika s posrednom pohranom su danas najzastupljeniji spremnici topline. Iako skuplji zbog potrebnog izmjenjivača topline, u kojem fluid za prijenos topline predaje toplinu materijalu za pohranu topline koriste se zbog kolektora koji prije nekoliko godina nisu mogli postići visoke radne temperature da bi otopljene soli s visokim temperaturama taljenja postale konkurentne naspram sintetičkih i termičkih ulja.

Termoklinski spremnici su najjeftiniji jer koriste jeftine materijale za pohranu topline, kao kamen i opeku, ali imaju malu gustoću pohrane topline pa su slabo zastupljeni.

Trenutno se najviše istražuju latentni spremnici topline, pogotovo s više materijala različitih temperatura taljenja i tekuće soli koje bi služile za prijenos i pohranu osjetne topline. Kod latentnih spremnika se traže rješenja da se toplinska provodnost povisi barem na 2 W/(mK) i ispituju se novi materijali, pogotovo nitratne i nitritne soli te njihove eutektičke smjese, a iste soli se ispituju i kao materijali za prijenos topline. Usavršavanjem paraboličnih protočnih kolektora tekuće soli zbog viših radnih temperatura istiskuju termička ulja iz upotrebe čime dolazi do bitnih poboljšanja solarnih elektran. Tekuće soli mogu se koristiti do 550 °C i pošto služe za prijenos i pohranu topline, izmjenjivač topline između spremnika više nije potreban. Zbog viših temperatura potrebno je manje materijala za pohranu topline i raste iskoristivost cijelog procesa, čak i do 6 % u usporedbi s elektranom s dva spremnika indirektno pohrane. [13]

Najzastupljenija sol za prijenos topline je upravo  $\text{NaNO}_3 - \text{KNO}_3$  (60%, 40%), jer je najviše ispitana te kroz mnoge dugotrajne primjene su poznata svojstva, životni vijek i stabilnost. Ispituju se svojstva smjesa i eutektičkih smjesa soli  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{LiNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_2$ ,  $\text{KNO}_2$  te se traže kombinacije s najnižom temperaturom taljenja, da se smanji opasnost od skrtnjivanja u cijevima te su dobivene kombinacije s čak 83 °C temperaturom taljenja [14]. Smjese tih soli imaju i visoku latentnu toplinu, ali zbog niskih temperatura fazne pretvorbe za ovu promatranu elektranu nisu prikladne, jer bi se mogle koristiti samo kao osjetni spremnici.

### 3. Dimenzioniranje spremnika i povećanje kolektorskog polja

Latentni spremnik topline potrebno je dimenzionirati za solarnu elektranu na ORC od 1 MW<sub>e</sub> koja je fiktivno smještena u Istri da joj omogući produljenje rada za 3 sata nakon što prestane s njezinim stacionarnim radom koji za postojeću konfiguraciju traje 4 sata.

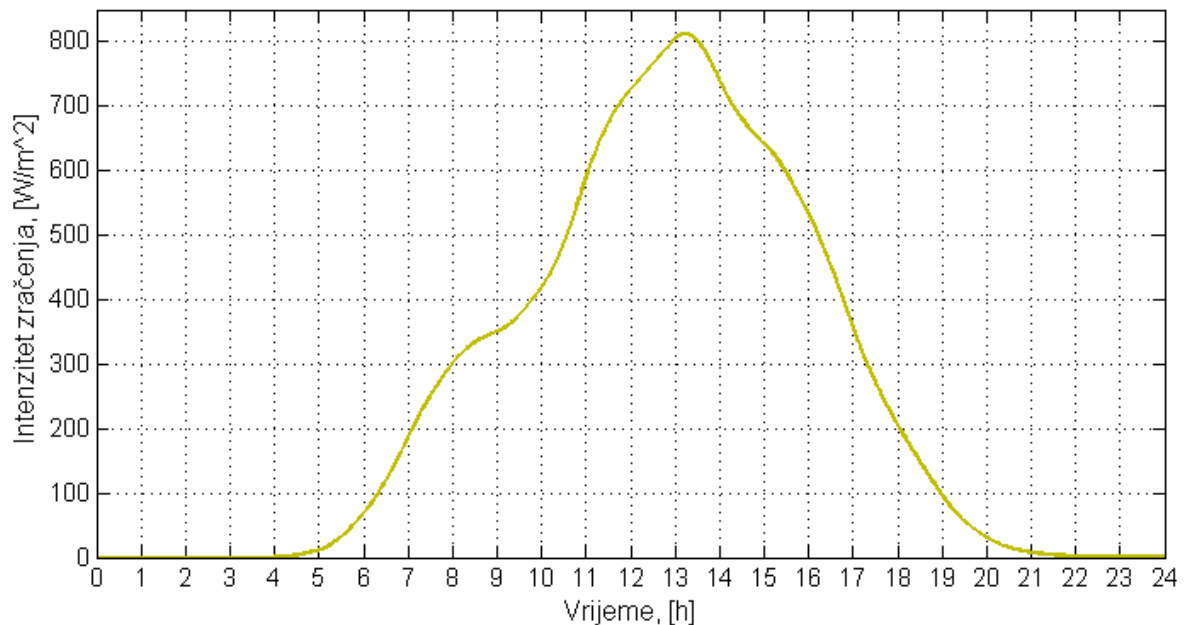
Latentni spremnik se može dimenzionirati na više načina ovisno o tome koliki se želi udio osjetne topline u ukupno pohranjenoj toplini. Nema smisla svu potrebnu toplinu pohraniti kao latentnu jer bi tada spremnik bio puno veći i pohranio bi puno više topline nego što je potrebno, a veliki bi dio topline bio akumuliran kao osjetna. U ovom radu spremnik će imati samo jednu vrstu tvari za pohranu topline i dimenzionirat će ga se tako da udio osjetne topline u ukupnoj toplini bude što veći. Time će se znatno smanjiti veličina spremnika i potrebno povećanje solarnog polja za razliku kada bi se željelo najveći dio topline pohraniti kao latentnu. Bitna stvar kod dimenzioniranja spremnika je hoće li se uzeti u obzir toplina koja se stvara u kolektorskom polju nakon što počne pražnjenje spremnika. Ako se računa s toplinskim tokom iz kolektorskog polja i tokom pražnjenja spremnika tada se dodatno smanjuje potrebna količina pohranjene topline. No, intenzitet sunčevog zračenja je promjenjiv i kod ovakvog malog postrojenja ne bi bilo dobro pouzdati se u taj toplinski tok. Radi sigurnosti rada i zadovoljavanja kriterija za produljenje rada postrojenja za 3 sata taj se toplinski tok neće uzeti u obzir prilikom dimenzioniranja spremnika. No, za simulacije rada spremnika prilikom pražnjenja će se uzimati u obzir toplinski tok koji nastaje u kolektorima, jer nema smisla voditi elektranu tako da se nakon prestanka rada elektrane na punom opterećenju isključi toplinski tok iz kolektorskog polja i samo postrojenje.

Ulazni podaci za dimenzioniranje spremnika preuzeti su iz završnog rada [8] i glase:

- Toplinski tok za rad generatora pare na punoj snazi iznosi 5386,777 kW
- Za ogrjevni fluid ili fluid za prijenos topline odabrano je termičko ulje naziva Xceltherm 600®
- Izlazna temperatura ulja iz kolektorskog polja i na ulazu u generator pare je 300 °C, a iz generatora pare 173 °C. Stoga je ulazna temperatura u spremnik prilikom punjenja 300, a prilikom pražnjenja 173 °C
- Zanimaruje se ovisnost fizikalnih svojstava materijala za pohranu topline (PCM-a) o temperaturi i uzimaju se konstantnima
- Odabrani kolektori su ravni Fresnel kolektori oznake FRT-1C10. Njihova iskoristivost je kako navodi proizvođač 55%. Postavljaju se kao moduli površine 223 m<sup>2</sup> i njihova početna postavljena količina je 76 kolektora, što predstavlja ukupnu površinu kolektorskog polja od skoro 17000 m<sup>2</sup>.

Općenito je za dimenzioniranje potreban dnevni profil zračenja za odabranu lokaciju, tj. profil ozračenja. Ozračenje je srednja gustoća dozračene snage Sunčevog zračenja, koja je jednaka omjeru snage Sunčevog zračenja i površine plohe okomite na smjer tog zračenja, a mjerna jedinica je W/m<sup>2</sup>. Pojam ozračenje se nekako izbjegava i često ga se zamjenjuje sa zračenjem, pa kako je poznatiji pojam profil zračenja, on će se i ovdje koristiti. Za odabranu lokaciju će se koristiti profil zračenja iz završnog rada [8]. Pretpostavit će se da je takav profil

zračenja karakterističan za sezonske uvjete rada i koristit će se za dimenzioniranje, dok će se kod simulacije tjednog rada elektrane dijagram proizvoljno promijeniti, kako bi se mogle simulirati neke pojave tokom rada.



Slika 12. Karakterističan profil zračenja [8]

Sunčevo zračenje može biti direktno i difuzno, a za sunčane kolektore je referentno direktno, tako da dijagram predstavlja intenzitet direktnog zračenja.

Generator pare dobiva toplinski tok za rad na punoj snazi od fluida za prijenos topline za koji je odabrano ulje pod trgovačkim imenom Xceltherm 600®. Radna tvar u generatoru pare upravo za odabrani radni tlak ima temperaturu isparavanja na 173 °C i zato je ta temperatura uzeta i za izlaznu temperaturu ulja jer se time uvijek osigurava normalni rad procesa, dakle, uvijek će doći do isparavanja radne tvari te viskoznost ulja nije prevelika pa su manji otpori trenja. Izlazna temperatura iz kolektora je uzeta konstantnom i promjena toplinskog toka je rezultat promjene masenog toka kroz sustav. Tako će se i za spremnik topline odabrati da toplina koja mu se dovodi ovisi samo o masenom protoku kroz spremnik.

Ako određeni prijelazi topline nisu zadovoljavajući, lokalno se može povećati maseni protok za postizanje traženih parametara i osigurati adekvatno punjenje i pražnjenje spremnika. To se može napraviti ugradnjom povratnih vodova koji omogućiti veću cirkulaciju ulja kroz pojedine dijelove sustava, kao npr. kroz spremnik topline. Zbog povratnog voda ulazna temperatura u spremnik se može razlikovati od pretpostavljene, no ako se povratni vod gleda kao dio spremnika i ulaz u spremnik se stavi prije miješališta povratnog voda, onda je pretpostavka zadovoljena. U daljnjem radu neće se baviti izvedbama cirkulacije ulja kroz sustav i miješalištima ulja koja se nalaze na spojevima spremnika s ostatkom sustava nego će se pretpostaviti da su koeficijenti prijelaza topline, a tako i brzine dovoljni.

Dimenzije spremnika ovise o materijalu koji se koristi i o vrstama poboljšanja prolaza topline, kao što su lamele na cijevima ili toplinske cijevi (termosifoni) itd. Za ovaj proračun je odabran materijal natrijev nitrit,  $\text{NaNO}_2$ , a neka njegova fizikalna svojstva navedena su u tablici 3. Odabran je baš taj materijal jer je njegova temperatura fazne pretvorbe  $271\text{ }^\circ\text{C}$  što je vrlo povoljno s obzirom na radne parametre solarne elektrane.

Tablica 4. Fizikalna svojstva natrijeva nitrita,  $\text{NaNO}_2$

temperatura taljenja, $\vartheta_t$ [ $^\circ\text{C}$ ]	271
gustoća, $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	2168
toplinska vodljivost, $\lambda$ [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]	1*
latentna toplina, $r$ [ $\text{kJ/kg}$ ]	212
specifični toplinski kapacitet, $c_p$ [ $\text{kJ}/(\text{kgK})$ ]	1*

(\*) vrijednosti su pretpostavljene uzimajući u obzir fizikalna svojstva sličnih spojeva

Tablica s fizikalnim svojstvima u ovisnosti o temperaturi za natrijev nitrit nisu nađena pa se neće uzimati u obzir promjena svojstava zbog porasta temperature, no numerički model je predviđen za nadopunjavanje ako se dođe do potrebnih podataka ili ako se odabere neka druga tvar.

Kako je dimenzioniranje iterativni proračun proveden je uz pomoću tabličnog kalkulatora Excel-a. Iz profila zračenja (slika 12) izračuna se toplinski tok koji se dobiva na kolektorima svaki sat preko izraza:

$$\Phi_K = n * A_m * \Phi_S * \eta \quad (3.1)$$

Iz podatak razdiobe toplinskih tokova tokom dana i poznatog potrebnog toplinskog toka za rad generatora pare lako se dobije iznos viška topline koji se akumulira tokom dnevnog rada elektrane. Dobiveni viška topline u kolektorima mora biti veći ili jednak potrebnoj toplini za trosatno produljenje rada elektrane.

Za dimenzioniranje spremnika neće biti uzet u obzir toplinski tok koji se stvara u kolektorskom polju tokom pražnjenja spremnika, jer se namjerno želi napraviti malo veći spremnik da bi elektrana imala veću sigurnost u rad. To će povećati troškove spremnika ali će elektrana biti inertnija na nagle promjene intenziteta zračenja, prije će započeti s radom iz hladnog starta, a tokom duljeg razdoblja s pogodnim uvjetima spremnik će moći produljiti pogon elektrane i malo više od tri sata. Kod pokretanja iz hladnog starta ne može se očekivati da će već prvog radnog dana biti pohranjeno dovoljno topline na dovoljno visokoj temperaturi za produljenje pogona postrojenja za tri sata, jer se spremnik neće dimenzionirati za takav rubni uvjet već za radni raspon temperatura koji će se pretpostaviti s obzirom na radne parametre organskog ciklusa, a stvarno stanje biti će vidljivo tek iz simulacije.

Iz potrebne topline koju spremnik mora sadržavati za produljenje rada izračuna se masa materijala s faznom pretvorbom iz izraza:

$$M = \frac{Q}{r + c_{pkr} * (\vartheta_t - \vartheta_1) + c_{pt} * (\vartheta_2 - \vartheta_t)} \quad (3.2)$$

gdje je toplina  $Q$  jednaka:

$$Q = \sum \Phi * t \quad (3.3)$$

Temperatura  $\vartheta_t$  je temperatura taljenja natrijeva nitrita, a temperature  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  predstavljaju radni raspon spremnika i iznose 180 odnosno 300 °C, koja je maksimalno postiziva temperatura u sustavu. Temperatura  $\vartheta_1$  je odabrana malo većom od izlazne temperature ulja iz generatora pare tako da se dobije malo veća masa PCM-a. Iz gornjih dviju formula dobiva se potrebna masa PCM-a koja može pohraniti traženu toplinu.

Potreban višak topline za pohranu u spremnik nije moguće dobiti s postojećom konfiguracijom solarnog polja već ga je potrebno povećati. Potrebna su 102 kolektora koji čine površinu od 22746 m<sup>2</sup>, dakle 26 nova kolektora što čini povećanje kolektorskog polja za 34 %. Nakon povećanja kolektorskog polja elektrani je produljen pogon na punom opterećenju s 4 na 6 sati.

Za tip spremnika odabran je Shell&Tube s jednim prolazom orgjevnog fluida i ujedno ima funkciju izmjenjivača topline jer drugačije se ne bi moglo napraviti punjenje spremnika zbog krute faze. Za cijevi spremnika odabrana je cijev nazivnog promjera  $D_N$  10 mm [15]. Spremnik nema nikakva poboljšanja za povećanje prolaza topline kao npr. lamele pa je zato potreban veliki broj cijevi s malim razmakom da se omogući brz prolaz topline. Preko dobivene mase se izračuna volumen materijala za pohranu topline, a iz volumena umnožak broja cijevi u spremniku i duljine cijevi. Prvo se odredi umnožak duljine i broja cijevi spremnika:

$$L * N = \frac{4 * M}{\rho * \pi * (D^2 - d^2)} \quad (3.4)$$

Oko svake cijevi nalazi se materijal za pohranu topline i radi lakšeg proračuna taj volumen je oblika valjka, tako da  $D$  predstavlja promjer tog volumena s materijalom za pohranu topline. Između tih valjkastih prostora s materijalom za pohranu topline zbog njihove geometrije postoje neispunjeni volumeni koji nisu uračunati u proračun, a u njih može stati oko 5 % od ukupne mase materijala. Taj iznos nije zanemariv no može ga se zaobići tako da se ne računa s tim volumenima, jer zbog nezgodnog oblika samo bi zakomplicirali dimenzioniranje spremnika, a kasnije i simulaciju rada. Tako da se ti volumeni ne zanemaruju nego se promjer oko cijevi s materijalom za pohranu proziva ekvivalentnim promjerom. On predstavlja takav promjer kod kojeg bi sav materijal za pohranu topline bio upravo u takvim valjkastim prostorima. U umnošku  $L*N$  mora se pretpostaviti jedna veličina i pretpostavlja se duljina cijevi na 15 metara tako da broj cijevi u spremniku iznosi 2165 ako se zanemare neispunjeni volumeni između valjkastih prostora, a stvarni broj cijevi bi mogao biti i manji,

ako se ti volumeni ispune s PCM-om i iznosio bi otprilike oko 2050, što je opet oko 5 % manje. Dakle, spremnik će imati nešto više cijevi nego što je potrebno i jedan manji dio spremnika u stvarnoj izvedbi neće biti ispunjen s materijalom za faznu pretvorbu, no to je i dobro jer treba ostaviti praznog prostora gdje će se moći proširiti materijal s faznom pretvorbom tokom otapanja i zagrijavanja, jer se uglavnom tvari prilikom zagrijavanja šire pa je potreban prostor za ekspanziju, a na ovaj način ga se osigurava bez potrebnog dodatnog proračuna.

Kod pražnjenje spremnika je dominantno provođenje topline, a kako odabrani materijal ima malu vrijednost toplinske provodnosti bitno je koliki je najveći razmak između cijevi zato da bi se omogućio dovoljan toplinski tok i pred kraj fazne pretvorbe. Stoga se iz izraz:

$$\Phi_{\text{lat}} = \frac{2 * \pi * \lambda * L * N * (\vartheta_t - \vartheta_c)}{\frac{\ln D}{d}} \quad (3.5)$$

gdje je  $\vartheta_c$  temperatura cijevi, provjerava hoće li spremnik imati dovoljno visok toplinski tok i kada završi fazna pretvorba te spremnik započne raditi kao osjetni spremnik. Ako se za temperaturu cijevi odabere 237 °C (što predstavlja 3/4 ukupne temperaturne razlike), tako da se dobiju što nepovoljniji uvjeti prilikom pražnjenja, tj. što manja temperaturna razlika, pokazuje se da i kada je sav materijal skrutnut dobiveni toplinski tok je dovoljan za pogon generatora pare. To je napravljeno zbog sigurnosti rada jer se još ne poznaje dinamika procesa u spremniku i nakon provedbe simulacije moći će se taj razmak dodatno povećati kako bi se smanjio broj cijevi radi pojeftinjenja spremnika. Zbog velikog broja cijevi spremnik ima veliku masu, no ako se ta masa glada kao dodatni kapacitet za pohranu topline onda se i ne treba toliko zamarati njegovom težinom jer zapravo samo povećava osjetni kapacitet spremnika.

Gubici topline prema okolišu nisu uračunati jer zbog velike izolacije pretpostavlja se da je to mali iznos. Također, u realnim uvjetima se na vanjskim stjenkama hladi materijal za pohranu topline i skrutnjuje se, a zbog male toplinske provodnosti dodatno poboljšava izolaciju pa nije prevelika greška zanemariti gubitke prema okolini.

Sunčevo zračenje tokom dana postepeno se mijenja i cijelo vrijeme se dobiva toplinski tok na kolektorima. Za dimenzioniranje spremnika korištena je samo onaj višak topline koji se dobiva tokom rada elektrane na punoj snazi, a tokom pražnjenja uzet je u obzir i toplinski tok koji nastaje u kolektorima, a manji je od potrebnog. Toplina koja se dobiva prije početka rada elektrane na punoj snazi ne koristi se za dimenzioniranje iz više razloga. Prvo, ne zna se cjelokupni rad elektrane i koliko je potrebno dovesti topline da bi ona došla na punu snagu, tj. koliko je potrebno topline za njeno progrijavanje. Drugo, ne zna se količina ulje u sustavu, a to ulje ima značajan toplinski kapacitet te nije prevelika greška ako se nigdje ne uračunava toplina dobivena prije početka rada, jer se ta toplina može koristiti upravo za zagrijavanje cijelog sustava. Također, može služiti i za pokrivanje toplinskih gubitaka koji nisu uračunati i



za zagrijavanje latentnog spremnika do njegove temperature koju je imao nakon završetka rada prošlog dana.

Tablica 5. Rezultati dimenzioniranja spremnika

Masa PCM-a, [kg]	170765
Duljina cijevi u spremniku, [m]	15
Broj cijevi, [-]	2165
Nazivni promjer cijevi, [mm]	10
Razmak između cijevi, [mm]	41,83
Promjer spremnika (bez izolacije), [m]	2,7
Masa cijevi, [kg] *	20524
Broj solarnih kolektora (početno stanje je 76)	102

(\*) Masa čitavog spremnika nije računata jer je za to potreban dodatni proračun čvrstoće spremnika, a za zadatak nije toliko bitna njegova stvarna konstrukcija.

### Potrebna veličina osjetnog spremnika

Za usporedbu izračunate su potrebne veličine triju osjetnih spremnika, pri čemu se u prvom spremniku nalazi najkorištenija sol za solarne elektrane, u drugom termičko ulje, a treći spremnik je s krutim materijalom, silikatnom opekom.

Tablica 6. Veličine osjetnih i latentnog spremnika

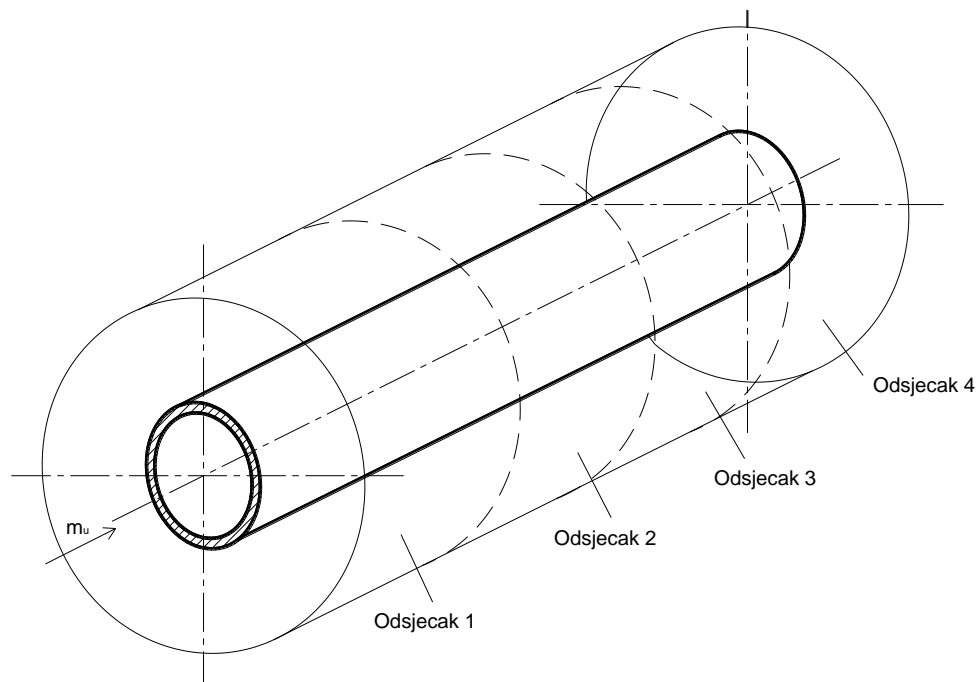
Materijal	Raspon temperatura, [°C]	Potrebna masa, [kg]	Volumen spremnika, [m <sup>3</sup> ]	Gustoća pohrane, [kJ/kg]	Gustoća pohrane, [MJ/m <sup>3</sup> ]
NaNO <sub>3</sub> – KNO <sub>3</sub>	250 – 300	760517	408,7	76,5	142,4
Dowtherm A	173 – 300	208230	240,2	279,4	242,2
silikatna opeka	173 – 300	458107	153	127	231,1
PCM, NaNO <sub>2</sub>	220 – 300	170765	78,77	268,3	581,7

Raspon temperatura označava minimalnu i maksimalnu temperaturu materijala za pohranu topline u sustavu, a nije ista za svaki materijal iz sljedećih razloga. Otopljena sol ne može imati veći raspon temperature jer ispod 240 °C dolazi do skrutnjivanja. Ta se sol zapravo može koristiti i za pohranu latentne topline, no u radu nije odabrana zbog niske temperature fazne pretvorbe s obzirom na radni raspon temperatura elektrane. Proračunom je određena minimalna temperatura PCM-a zbog sigurnosti rada. Sintetičko ulje i opeka imaju najveći mogući raspon temperatura, jer nemaju ograničavajuće faktore.

Latentni spremnik je najlakši i najmanji zbog svih prednosti navedenih ranije. Osjetni spremnik s termičkim uljem po težini može konkurirati latentnom, što se vidi iz gustoće pohrane topline izražene po masi. Kada se uspoređuju spremnici po volumenu tada se čak više isplati koristiti jeftinu silikatnu opeku nego termičko ulje. Iako postoje još brojni drugi materijali za osjetne i latentne spremnike usporedba se je ograničila samo na ova četiri materijala, jer cilj nije bila usporedba materijala nego su se htjele kvantitativno dočarati prednosti latentnih spremnika.

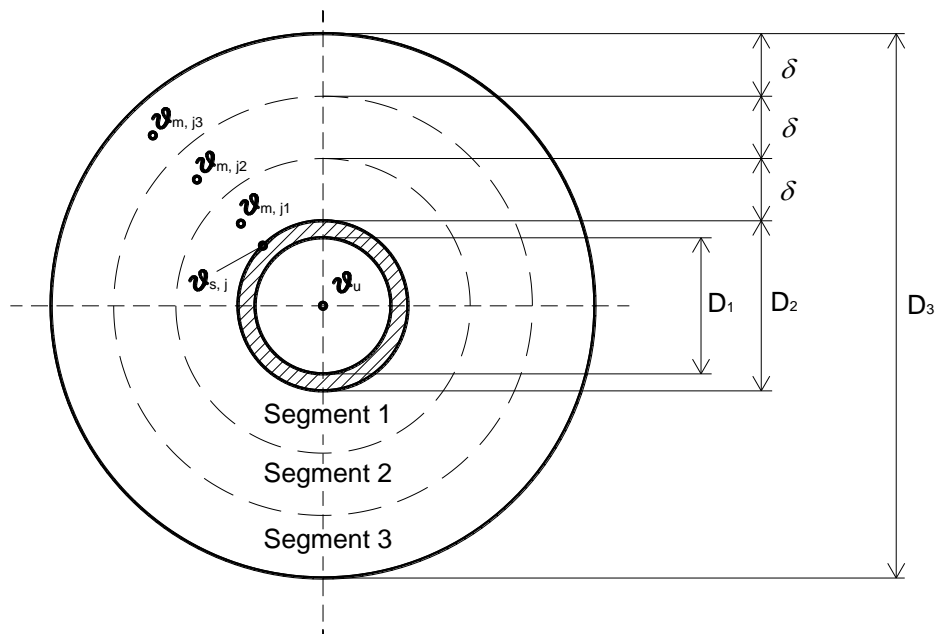
## 4. Matematički model latentnog spremnika topline

Latentni spremnik dimenzioniran u prethodnom poglavlju je napravljen s jednim prolazom ogrjevnog fluida pa je slika procesa jednaka za sve cijevi i dovoljno je opisati dinamiku procesa za jednu cijev tj. za referentni volumen (referentnu cijev), a prave vrijednosti su samo uvećane za broj cijevi. Referentni volumen (slika 13) se sastoji od jedne cijevi i volumena PCM-a oko te cijevi. Referentni volumen je podijeljen na 4 segmenta uzdužno, a u svakom segmentu je PCM podijeljen na 3 segmenta, koji se numerirani tako da je segment 1 najbliži cijevi itd. Radi lakšeg snalaženja segmenti referentne cijevi će se nazivati odsječci cijevi, a pod segmentima će se podrazumijevati slojevi volumena PCM-a u svakom odsječku cijevi.



Slika 13. Podjela referentne cijevi na odsječke

Označeni smjer strujanja ulja kroz cijev vrijedi za punjenje spremnika, a prilikom pražnjenja je obrnuti.



Slika 14. Podjela odsječka na segmente i dimenzije

Matematički model se sastoji od bilanci energije za ulje, sijenku i PCM i jednadžbi koje opisuju toplinske tokove. Matematički model je postavljen tako da opisuje i punjenje i pražnjenje spremnika.

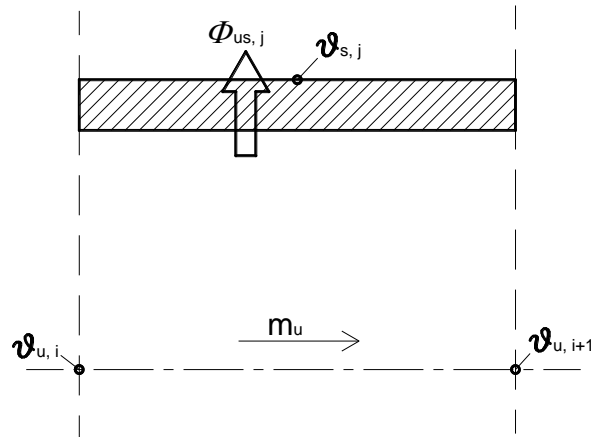
Radi pojednostavljenja matematičkog modela, a ne narušavajući bitno fizikalnost procesa, uvode se sljedeća zanemarenja i pretpostavke:

- Toplinski gubici prema okolišu i provođenje topline u aksijalnom smjeru nisu uzeti u obzir zbog debele izolacije odnosno velikog toplinskog otpora zbog niske provodnosti PCM-a i male površine za prijenos topline
- Ne razmatra se strujanje ulja kroz cijevi, profili brzina, gubici trenja i potrebna snaga pumpe za ostvarenje protoka
- U bilanci energije za PCM prati se promjena entalpije, a ne promjena temperature
- Koeficijenti prijelaza topline se pretpostavljaju i uzimaju konstantnim. Za vrijednosti su odabrani iznosi karakteristični za prisilno strujanje ulja u cijevima, a za slobodnu konvekciju tekućeg PCM-a oko cijevi pretpostavlja se da ima slične karakteristike kao i za ulje pa tako i koeficijent konvekcije
- Ne razmatra se dinamika procesa u generatoru pare nego se samo osigurava potreban toplinski tok za njegov rad, a potrebne temperaturne razlike za prijenos topline osigurane su kroz prije navedene pretpostavke o ulaznim i izlaznim temperaturama

Glavni oblik prolaza topline tokom punjenja je prirodna konvekcija koja nastaje zbog razlike u gustoći taline na površini cijevi i malo dalje od nje, a tokom pražnjenja provođenje kroz krutinu. Sljedeći izrazi opisuju i punjenje i pražnjenje spremnika pa se jednim matematičkim modelom opisuju obje pojave što će znatno olakšati izradu numeričkog modela.

## 4.1. Bilance energije

### 4.1.1. Bilanca energije za ogrjevni fluid



Slika 15. Modelski prikaz za bilancu energije ogrjevnog fluida

Ogrjevni fluid prolaskom kroz segment se hladi jer predaje svoju toplinu hladnijoj stijenci cijevi.

$$\frac{dE_u}{dt} = M_u c_{p,i} \frac{d\vartheta_{u,i}}{dt} = m_u (c_{p,i} \vartheta_{u,i} - c_{p,i+1} \vartheta_{u,i+1}) - \Phi_{us,j} \quad (4.1)$$

gdje je  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ , a  $j = 1, 2, 3, 4$ .

Kod punjenja  $\vartheta_{u,1}$  je temperatura ulja na ulazu u spremnik i iznosi 300 °C. Maseni protok ulja ovisi o toplinskom toku iz kolektora, a toplinski kapacitet ulja je funkcija temperature. Kako su poznati podaci promjene toplinskog kapaciteta ulja o temperaturi izračunat je polinom trećeg stupnja koji dobro opisuje tu ovisnost za raspon temperatura od 150 do 300 °C i koristi se u numeričkom modelu, a glasi:

$$c_p = f(\vartheta_u) = 2,02527 * 10^{-6} * \vartheta^3 - 0,00118722 * \vartheta^2 + 3,6018726 * \vartheta + 1919,963$$

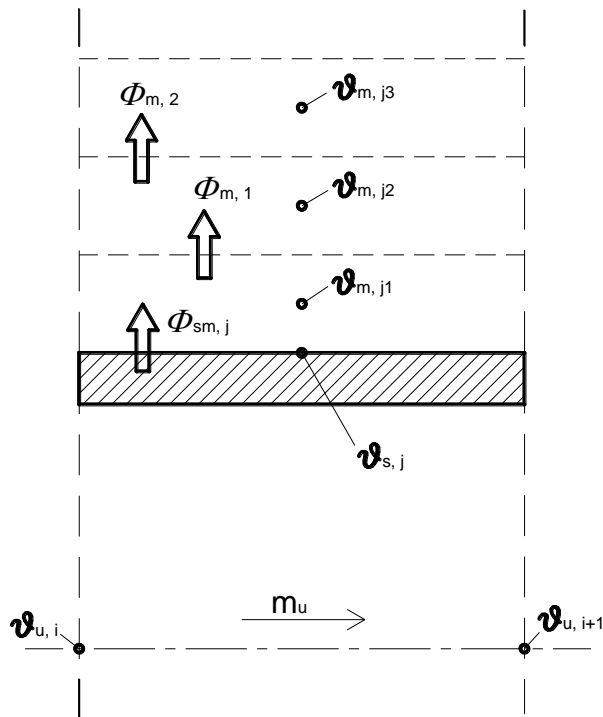
Kod pražnjenja maseni protok je suprotnog smjera nego na slici 15. Tada poprima negativnu vrijednost, a kako je razlika ulazne i izlazne temperature iz odsječka i dalje pozitivna, toplinski tok je negativan. Stoga izraz (4.1) opisuje i punjenje i pražnjenje spremnika.

### 4.1.2. Bilanca energije za stijenku

Stijenka dobiva toplinu od ogrjevnog fluida, a gubi ju prema prvom segmentu i ta relacija glasi:

$$\frac{dE_s}{dt} = M_s c_j \frac{d\vartheta_{s,j}}{dt} = \Phi_{us,j} - \Phi_{sm,j}$$

## 4.1.3. Bilanca energije za segmente PCM-a



Slika 16. Modelski prikaz za bilancu energije po segmentima

Cijev je podijeljena u četiri segmenta, a PCM je u svakom segmentu dodatno podijeljen u tri segmenta i njegova bilanca energije glasi:

$$\frac{dE_{m,jk}}{dt} = \frac{M_m}{3} \frac{dh_{m,jk}}{dt} = e_{ulaz} - e_{izlaz}$$

(4.3)

uz uvjet:

$$\vartheta_{m,jk} = \begin{cases} \frac{h_{m,jk}}{c_{p,kr}} & \text{za } h_{m,jk} < h_1 \\ \vartheta_{m,jk} = \vartheta_t & \text{za } h_{m,jk} \in [h_1, h_2] \\ \frac{h_{m,jk}}{c_{p,t}} & \text{za } h_{m,jk} > h_2 \end{cases}$$

gdje je  $k = 1, 2, 3$ , a energije ulaza i izlaza:

$$e_{ulaz} = \begin{cases} \Phi_{sm,j} & \text{za } k = 1 \\ \Phi_{m,jk} & \text{za } k = 2, 3 \end{cases}$$

$$e_{izlaz} = \begin{cases} \Phi_{m,jk+1} & \text{za } k = 1,2 \\ 0 & \text{za } k = 3 \end{cases}$$

Zbog nepoznavanja ovisnosti toplinskog kapaciteta PCM-a o temperaturi, uzima se da je konstantan, a kruta i tekuća fazu imaju različite vrijednosti. Da bi se matematički model pojednostavnio u bilanci energije za PCM promatra se promjena entalpije PCM-a, a ne temperature, jer se tako može izbjeći nezgodno opisivanje ovisnosti promjene površine za izmjenu topline i otopljene mase. Ta relacija je nezgodna jer nije ista za taljenje i skrutnjivanje PCM-a, tj. za punjenje i pražnjenje spremnika. Temperatura PCM-a se stoga računa iz entalpije, a  $h_1$  i  $h_2$  predstavljaju entalpiju početka odnosno kraja fazne pretvorbe. Temperatura  $\vartheta_t$  je temperatura taljenja PCM-a i uzima se da je tokom fazne pretvorbe konstantna u cijelom segmentu. U segmentima se uzima da postoji samo jedna jedinstvena temperatura i ne razlikuje se temperatura krute i tekuće faze tokom fazne pretvorbe. Mase  $M_u$ ,  $M_s$  i  $M_m$  predstavljaju četvrtinu od ukupnih masa u spremniku.

## 4.2. Jednadžbe toplinskih tokova

### 4.2.1. Toplinski tok ulje – unutarnji rub sijenke cijevi

Kod prolaza topline s ulja na stijenku postoji konvekcijski i kondukcijski prolaz te se on opisuje pomoću izraza:

$$\Phi_{us,j} = \frac{2\pi LN * (\vartheta_{u,i+1} - \vartheta_{s,j})}{\frac{1}{R_1 \alpha_{un}} + \frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (4.4)$$

Radi jednostavnosti i tanke stijenke cijevi temperatura cijevi se ne računa na njezinoj sredini nego na njezinom vanjskom rubu gdje je ona u kontaktu s PCM-om, što puno pojednostavnjuje uvjet kada će doći do taljenja PCM-a. Koeficijent prijelaza topline  $\alpha_{un}$  označava prijelaz topline s ulja na stijenku i uzet je konstantnim te se pretpostavlja da iznosi  $300 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  [16].

### 4.2.2. Toplinski tok stijenka – prvi segment

Karakter toplinskog toka između stijenke i prvog segmenta ovisi o temperaturi stijenke cijevi te ako je ona niža od temperature taljenja PCM-a radi se o kondukciji, a ako je viša onda dolazi do konvekcije:

$$\Phi_{sm,j} = \begin{cases} \frac{2\pi \lambda LN}{\ln \frac{R_2 + 0,5\delta}{R_2}} * (\vartheta_{s,j} - \vartheta_{m,j1}) & \text{za } \vartheta_{s,j} < \vartheta_t \\ \alpha_v * 2\pi LN * (R_2 + 0,5\delta) * (\vartheta_{s,j} - \vartheta_{m,j1}) & \text{za } \vartheta_{s,j} > \vartheta_t \end{cases} \quad (4.5)$$

Koeficijent prijelaza topline  $\alpha_v$  predstavlja slobodni konvekcijski prijelaz topline sa stijenke cijevi na PCM te kako nisu poznata svojstva PCM-a pretpostavlja se da on u tekućem stanju ima slična svojstva ulju pa se iz okvirnih tablica za prijelaze topline pretpostavlja njegova vrijednost na  $188 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , kao da se radi o ulju. [16]

$\delta$  je debljina jednog segmenta s PCM-om, a ujedno je i udaljenost između referentnih temperatura za dva susjedna segmenta.

#### 4.2.3. Toplinski tok prvi – drugi segment i drugi – treći segment

Toplinski tokovi prema drugom i trećem segmentu označavaju se s indeksima 2 i 3, a razlika između njih je u udaljenosti od stijenke cijevi što je opisano s debljinom segmenta  $\delta$ :

$$\Phi_{m,jk} = \Phi_{m,jk+1} = \begin{cases} \frac{2\pi\lambda LN}{k_1} * (\vartheta_{m,jk} - \vartheta_{m,jk+1}) \text{ za } \vartheta_{m,jk} < \vartheta_t \\ \frac{2\pi\lambda LN}{k_2} * (\vartheta_{m,jk} - \vartheta_{m,jk+1}) \text{ za } \vartheta_{m,jk} \geq \vartheta_t \\ \alpha_v * 2\pi LN * k_3 * (\vartheta_{m,jk} - \vartheta_{m,jk+1}) \text{ za } \vartheta_{m,jk+1} \geq \vartheta_t \end{cases} \quad (4.6)$$

gdje su:

$$k_1 = \begin{cases} \frac{2\pi\lambda LN}{\ln \frac{R_2 + 1,5\delta}{R_2 + 0,5\delta}} \\ \frac{2\pi\lambda LN}{\ln \frac{R_2 + 2,5\delta}{R_2 + 1,5\delta}} \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} \frac{1}{(R_2 + \delta)\alpha_v} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{R_2 + 1,5\delta}{R_2 + \delta} \\ \frac{1}{(R_2 + 2\delta)\alpha_v} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{R_2 + 2,5\delta}{R_2 + 2\delta} \end{cases}$$

$$k_3 = \begin{cases} (R_2 + 1,5\delta) \\ (R_2 + 2,5\delta) \end{cases}$$



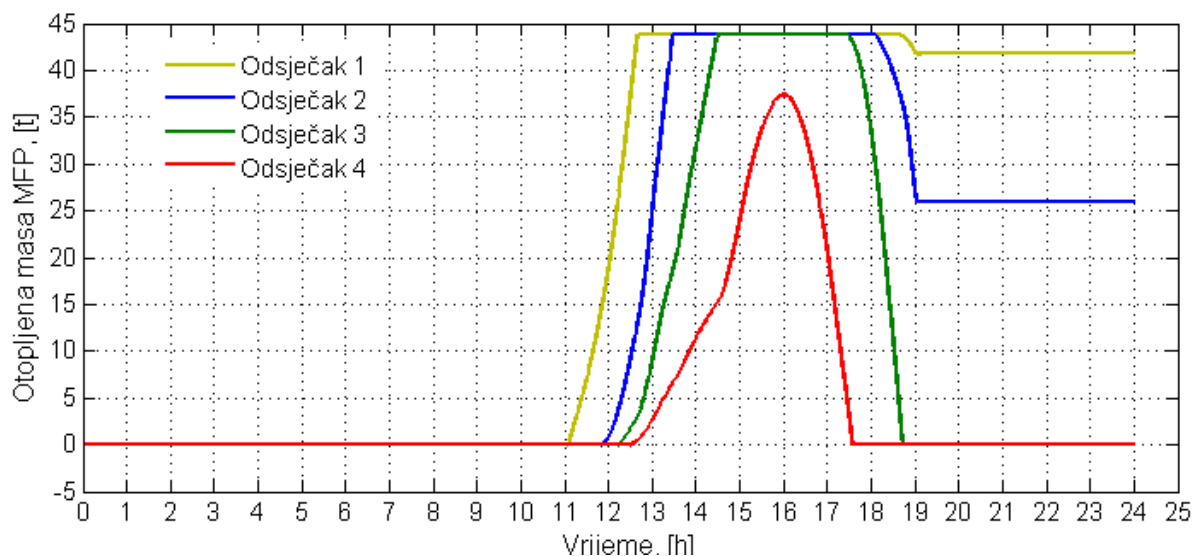
## 5. Rezultati simulacije

Numerički model napravljen u Simulinku uspješno ilustrira punjenje i pražnjenje spremnika. Biti će prikazani rezultati za jedan radni dan bez ikakvih poremećaja, a zatim će se dati rezultati za tjedni rad elektrane bez poremećaja i s proizvoljno odabranim poremećajima. Poremećaji će biti jedino vezani uz promjene profila zračenja.

Pratila se je promjena otopljene mase PCM-a, izlazne temperature ulja iz odsječaka i temperature segmenata s PCM-om. Prikazan je i dijagram promjene toplinskog toka iz kolektorskog polja i toplinskog toka iz spremnika topline prilikom pražnjenja. Tokom pražnjenja računalo se je s toplinskim tokom iz kolektorskog polja.

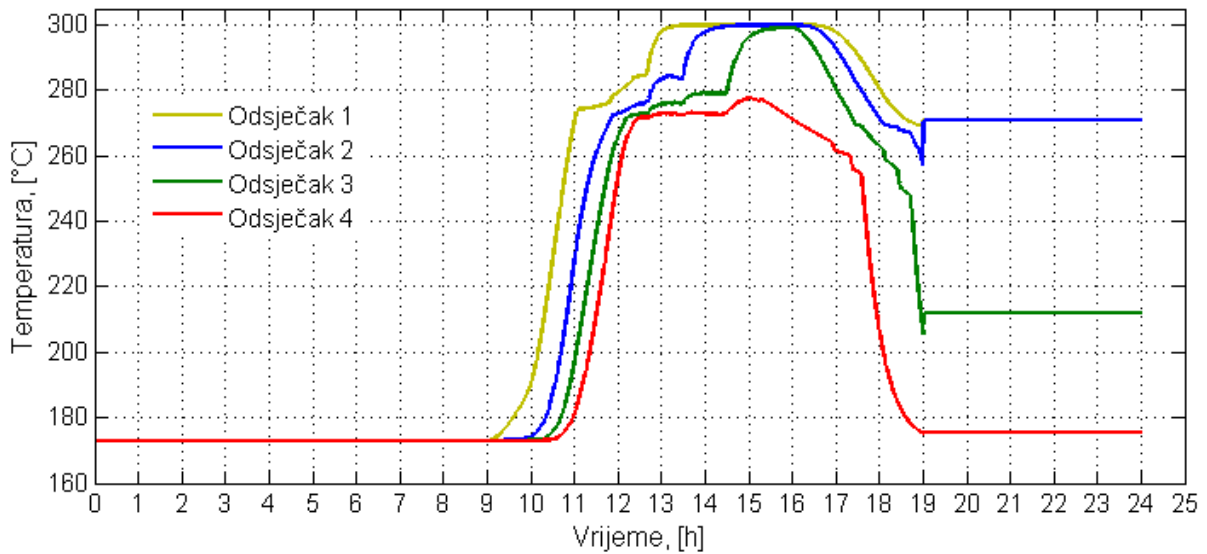
### 5.1. Dnevni rad

Tokom jednog radnog dana spremnik je potrebno zagrijati s temperature jednake izlaznoj temperaturi iz generatora pare i napuniti ga s toplinom potrebnom za trosatno produljenje. Za dnevni rad nije bilo uključeno ograničenje izlazne temperature ulja pa je namješteno da spremnik rad točno tri sata, iako bi mogao i više. Tokom dimenzioniranja se je računalo s nešto višim temperaturama pa se ne očekuje otapanje svog PCM-a.



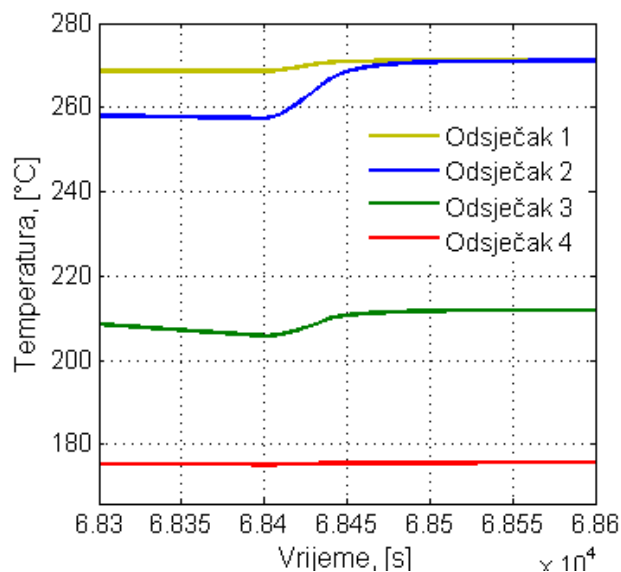
Slika 17. Promjena otopljene količine PCM-a tokom vremena po odsječcima

Početna temperatura čitavog spremnika je bila 173 °C te kako je spremnik dimenzioniran za raspon temperatura od 180 do 300 °C nije sva masa u četvrtom odsječku otopljena, jer toplina za njeno potpuno otapanje je dijelom utrošena, tj. pohranjena kao osjetna toplina. Pražnjenje spremnika počinje nakon šestog sata rada ili poslije 16 sati dana. U trećem i četvrtom odsječku se sva masa skrutne, dok u prvo i drugom segmentu još ostane puno tekuće faze, jer spremnik nije morao predati svu toplinu generatoru pare, jer spremnik produljuje rad za samo tri sata.



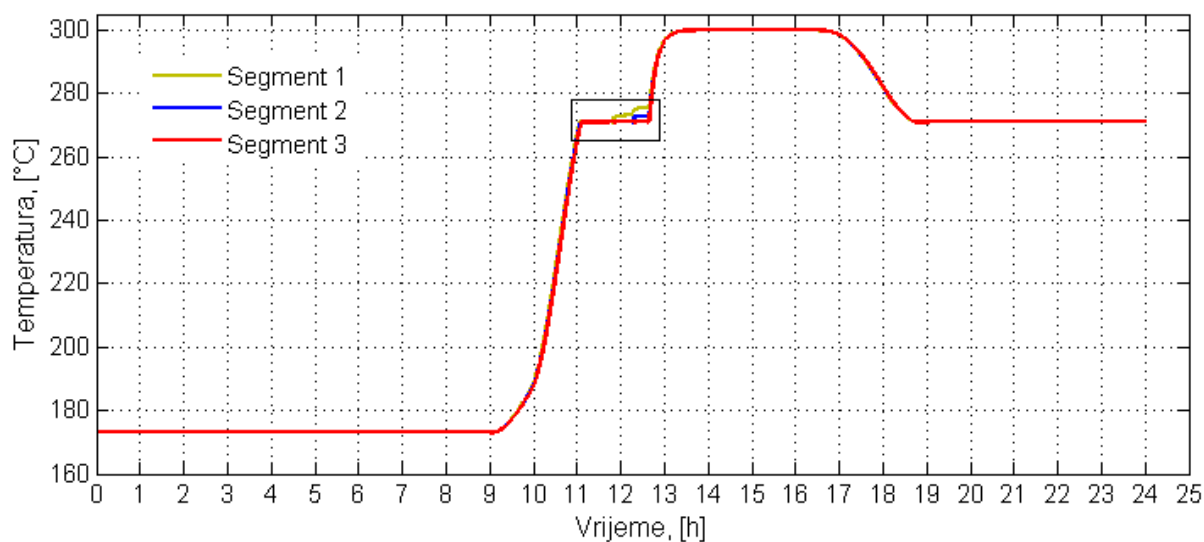
Slika 18. Temperatura ogrjevnog fluida po odsječcima

Numerički model je napravljen tako da prilikom punjenja ogrjevni fluid struji u jednom smjeru, a tokom pražnjenja u drugom smjeru zato da bi se spremnik približio protustrujnom izmjenjivaču topline i da bi izlazna temperatura ulja bila što viša. Stoga do 16 sati dobivene temperature ulja su vrijednosti na izlazima iz odsječaka, a poslije one označavaju vrijednosti na ulazima u odsječke, jer se je promijenio smjer strujanja ulja kroz spremnik, ali ne i označavanje odsječaka. Između 15 i 16 sat izlazna temperatura iz četvrtog odsječka počinje opadati iako još nije počelo pražnjenje, jer je sve manji dolazni toplinski tok, a odlazni toplinski tok prema segmentima je i dalje velik zbog preostalog PCM-a u krutoj fazi koji se može otopiti. Tokom pražnjenja očekivano se je u četvrtom odsječku najviše snizila temperatura i taj je odsječak jedini predao svu svoju toplinu. Temperatura ulja na izlazu iz spremnika pred kraj rada je negdje oko 271 °C što je poželjno zbog potrebne temperaturne razlike u generatoru pare. Inače izlazno ulje se prije ulaska u generator pare miješa s uljem iz kolektora koje je na 300 °C pa temperatura na ulazu u generator pare je još nešto viša od one sa slike.

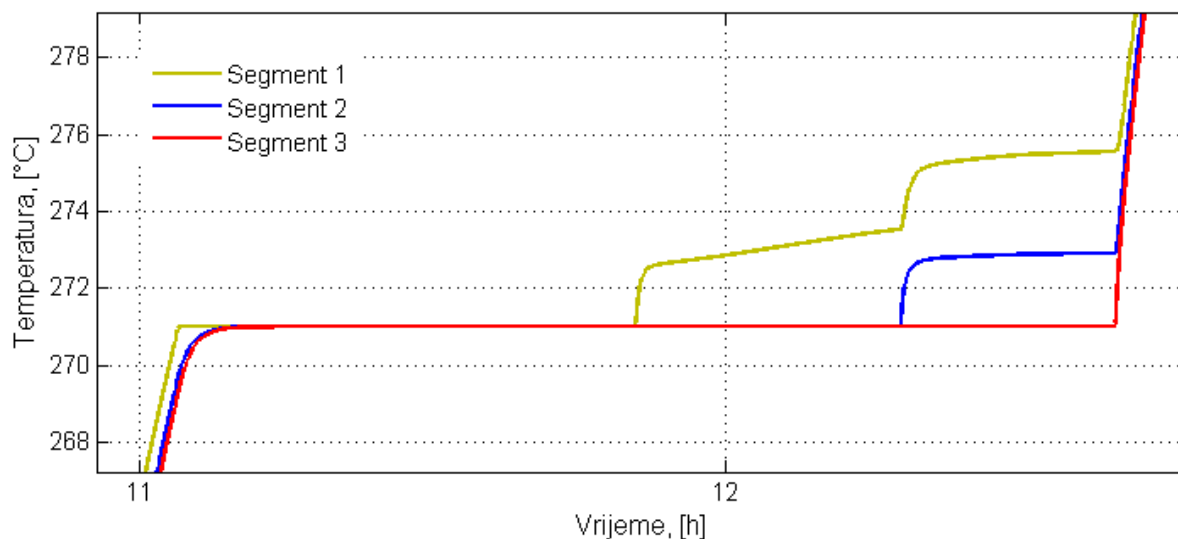


Slika 19. Detalj završetka rada spremnika

Po završetku rada temperature ulja u odsječcima malo porastu što je rezultat izmjene topline i izjednačavanje temperature između segmenata PCM-a. Kada bi se dodale jednadžbe aksijalnog provođenja topline onda bi temperature u cijelom spremniku težile izjednačavanju, no to bi bio spori proces jer je taj iznos jako mali, naspram toplinskog toka za generator pare te tokom noći između radnih dana došlo bi do neznačajnog ujednačenja temperatura između odsječaka.

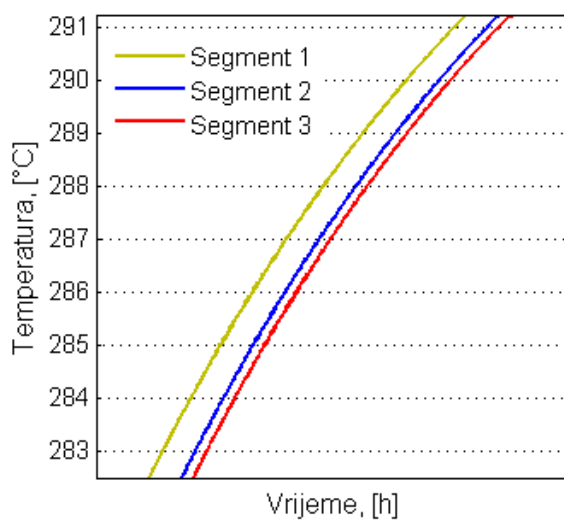


Slika 20. Promjena temperature PCM-a u prvom odsječku

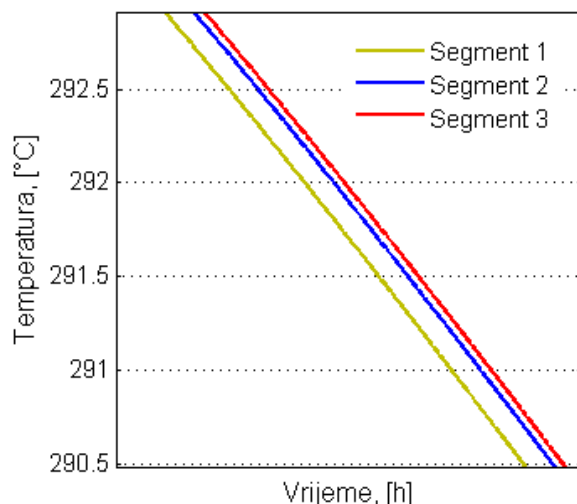


Slika 21. Detalj s krivulje

Zbog male udaljenosti između segmenata ne dolazi do velikih razlika u temperaturama. Nakon što se sva masa u prvom segmentu otopi, talina se blago zagrijava, no zbog velikog odlaznog toplinskog toka ne bilježi značajni porast temperature sve dok se i u ostalim segmentima ne otopi masa PCM-a.

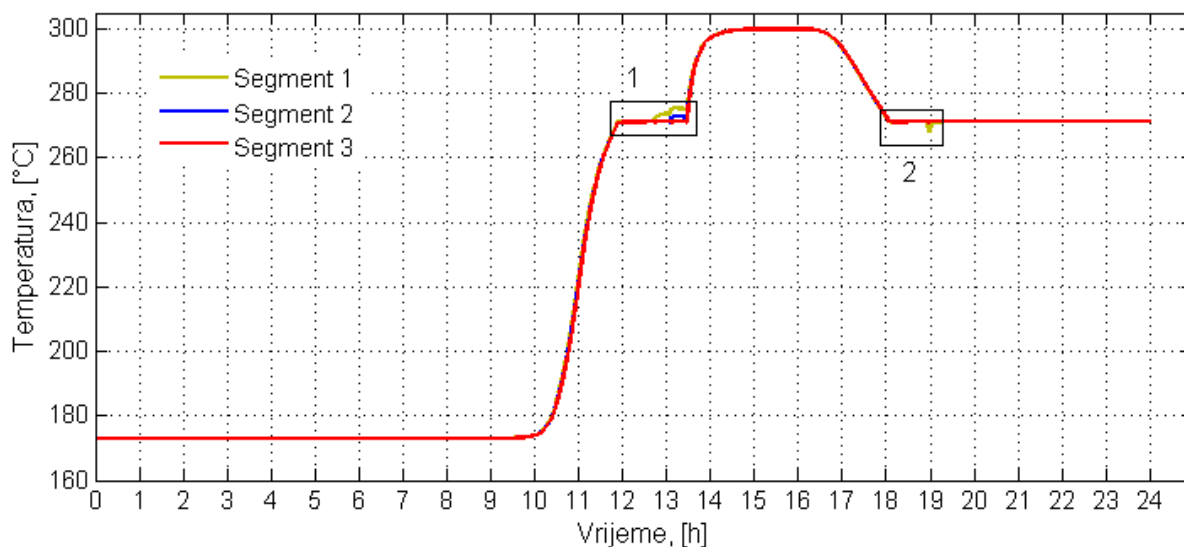


Slika 22. Uvećani prikaz odnosa temperatura segmenata tokom punjenja

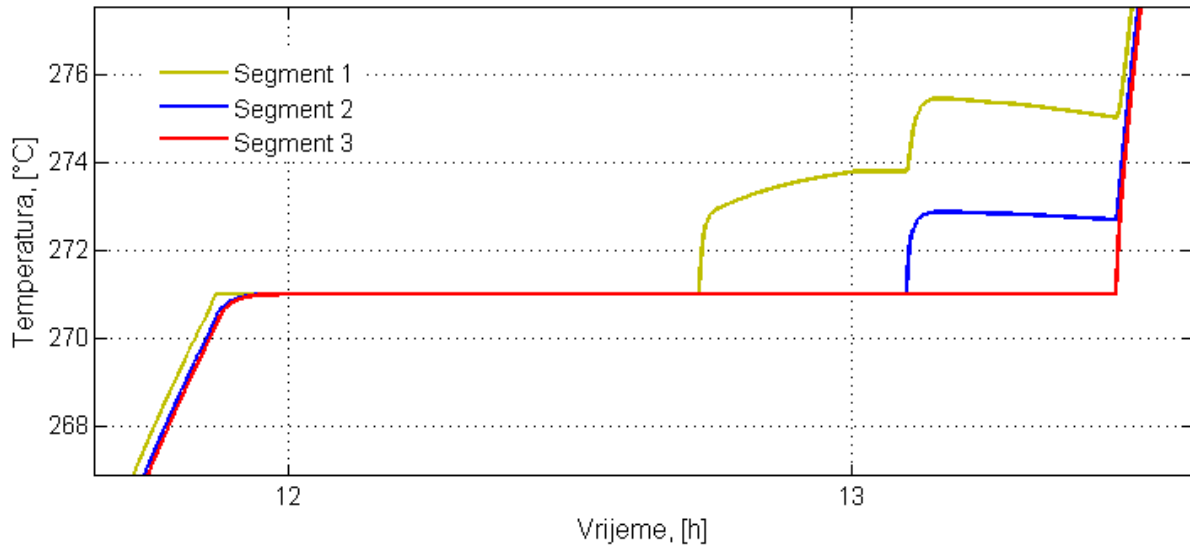


Slika 23. Uvećani prikaz odnosa temperatura segmenata tokom pražnjenja

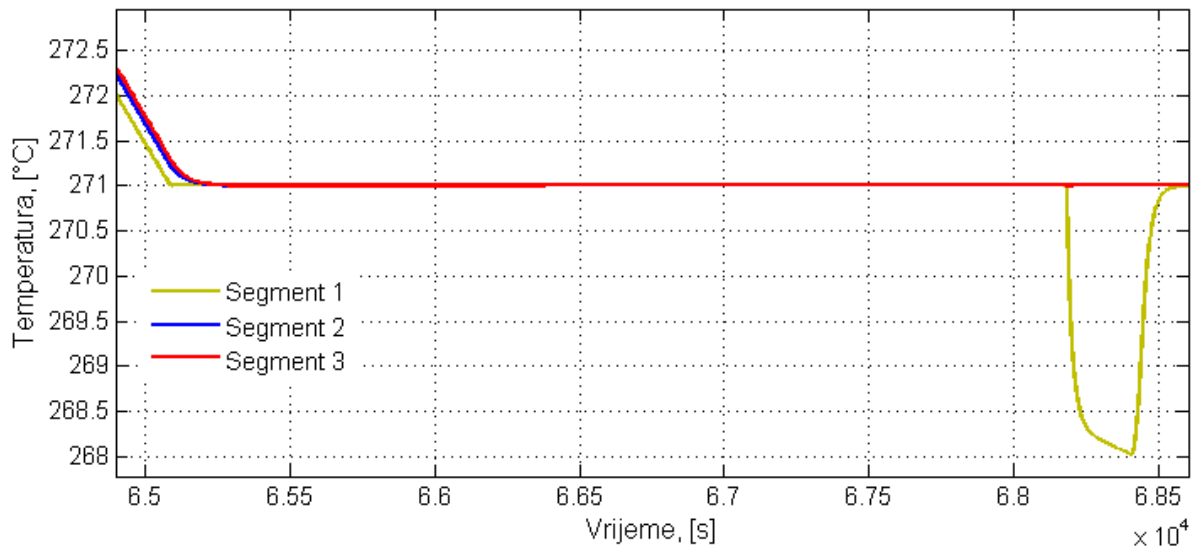
Slike 22 i 23 još zornije prikazuju utjecaj male udaljenosti cijevi. Tokom izmjene osjetne topline temperature segmenata su vrlo bliske i razlikuju se maksimalno do 2 °C. Ta dva detalja ne prikazuju odnose temperatura samo na odabranim mjestima, nego isti odnosi vrijede za sve odsječke i za bilo koji vremenski interval tokom kojeg se izmjenjuje osjetna toplina, stoga nije precizirano s kojeg dijela krivulje su uzeti. Uz to, ova dva detalja pokazuju i opće poznatu stvar, a to je da prilikom punjenja spremnika temperatura u prvom segmentu je najviša jer je segment najbliže cijevi, a tokom pražnjenja je najniža jer se taj segment najbolje hladi.



Slika 24. Promjene temperature PCM-a u drugom odsječku

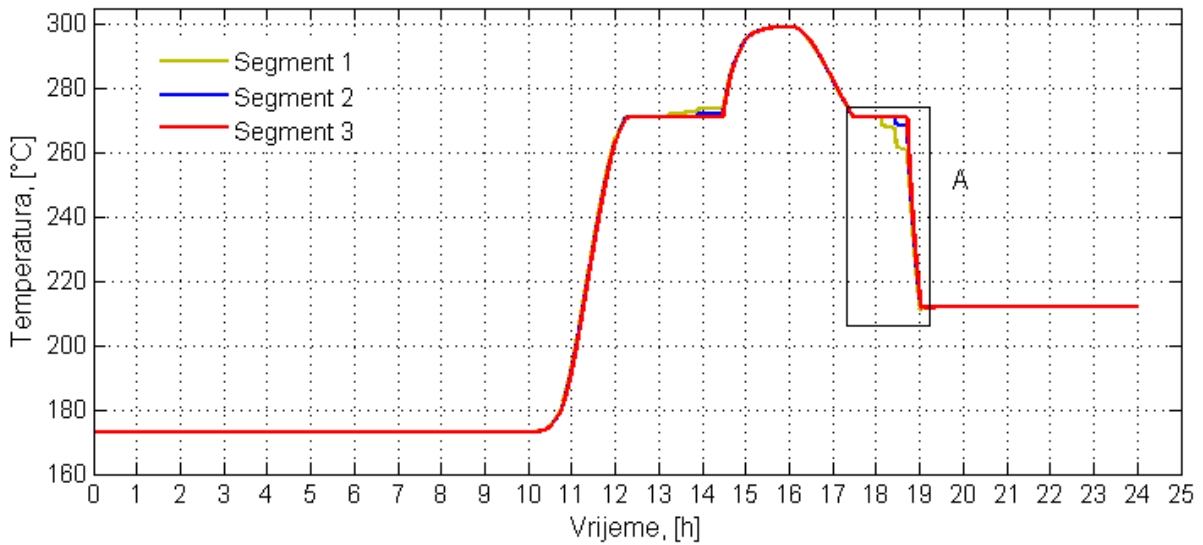


Slika 25. Detalj 1

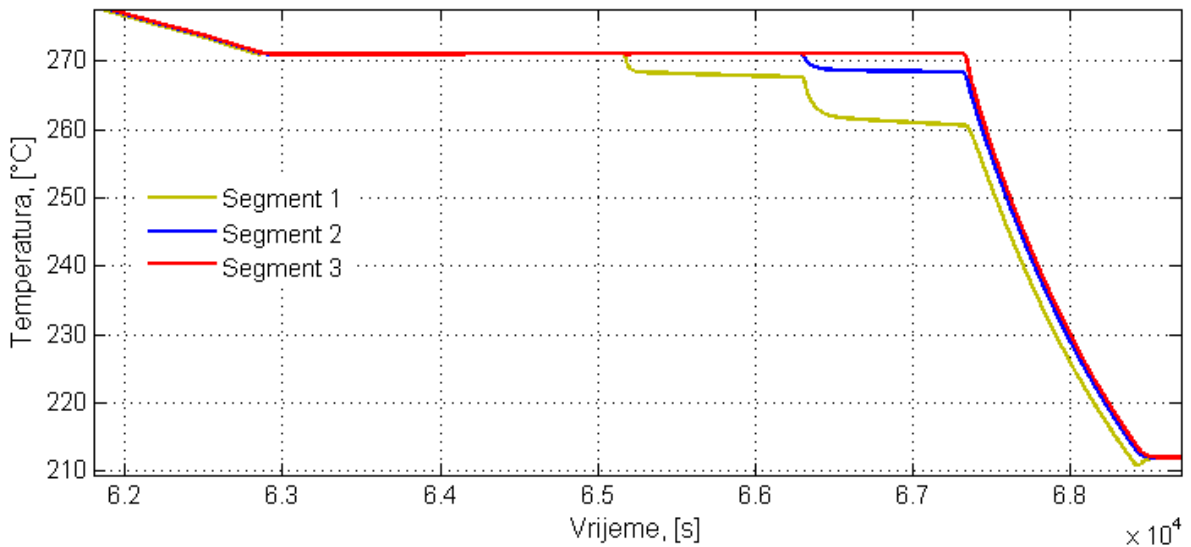


Slika 26. Detalj 2

U drugom odsječku nema bitnih razlika naspram prvog odsječka. Detalj 2 uvećava kraj pražnjenja spremnika. Pad temperature u prvom segmentu se događa zbog potrošene sve latentne topline, a nagli porast nakon toga se pojavljuje zbog prestanka pražnjenja spremnika i zbog zagrijavanja prvog segmenta toplinom iz drugog segmenta u kojem se nalazi i dio taline.

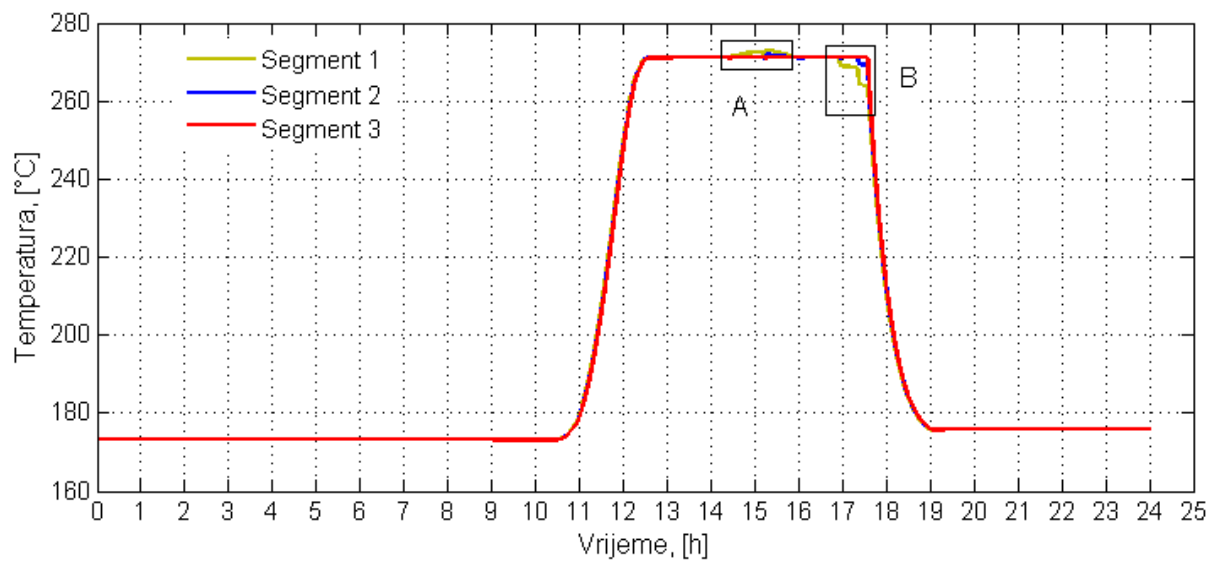


Slika 27. Promjene temperatura PCM-a u trećem odsječku

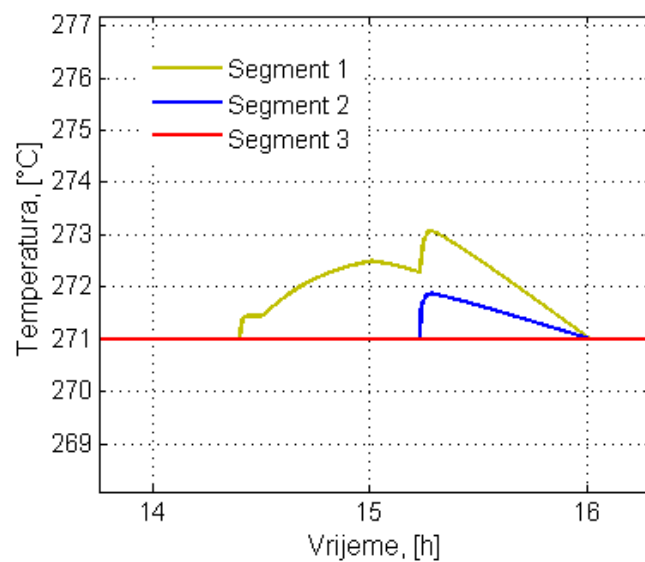


Slika 28. Detalj A

Treći odsječku relativno brzo preda svu svoju latentnu toplinu pa se stoga pothlađuje. Kao i kod drugog segmenta, na kraju pražnjenja dolazi do izjednačavanja temperatura u odsječku, pa temperatura u prvom segmentu raste, no zbog sličnosti procesa kao i na slici 26 taj detalj nije uvećan.

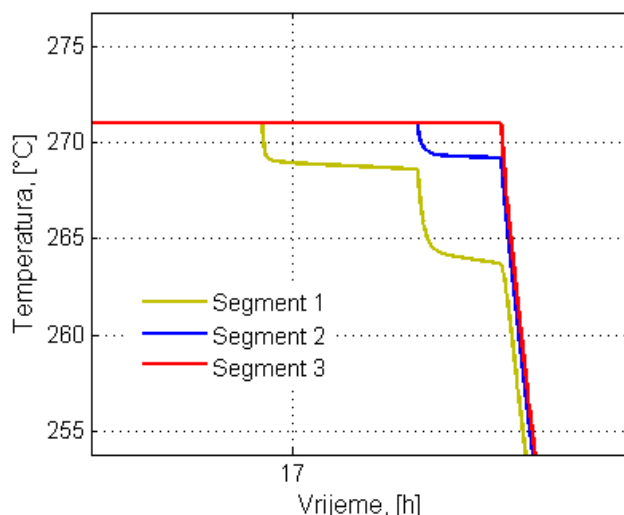


Slika 29. Promjene temperatura PCM-a u četvrtom odsječku



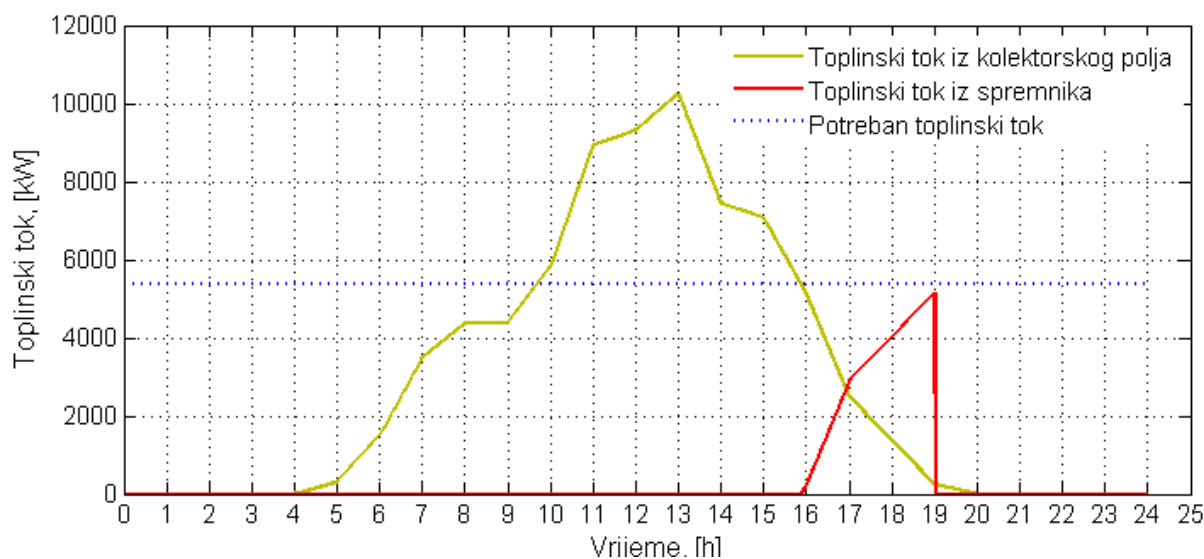
Slika 30. Detalj A





Slika 31. Detalj B

Jedino u četvrtom odsječku ne dolazi do pregrijanja taline jer za to nema dovoljno topline. Iz tog razloga je određeno da ulje tokom rada spremnika mijenja smjer jer ako bi se zadržao isti smjer onda četvrti odsječak ne bi puno pridonio u zagrijavanju ulja tokom pražnjenja i njegova toplina ne bi bila iskorištena.



Slika 32. Promjena toplinskog toka iz kolektora i iz spremnika topline

Slika je naknadno stavljena te nije potpuno usklađena s prethodnim slikama. To se vidi iz toga što na ovoj slici punjenje spremnika počinje malo prije 10 sati, a na slici 49 se vidi da punjenje počinje u 9 sati. To je zbog toga što je za prethodne slike korišten profil zračenja sa srednjim satnim vrijednostima (njegov bi izgled bio stepeničast), a ne s kontinuiranom promjenom kao što je to na slici 44. Time nije dobivena netočna slika punjenja već je ispitana važnost točnosti oblika profila zračenja i uspostavlja se da je svejedno je li profil zračenja sa srednjim satnim vrijednostima ili s kontinuirano promjenjivim vrijednostima.

Slika prikazuje vrijeme punjenja i pražnjenja spremnika te toplinski tok iz spremnika potreban za produljenje rada elektrane za tri sata. Plava točkasta linija prikazuje potreban toplinski tok za rad generatora pare, pa tako i turbine na punoj snazi. Punjenje spremnika počinje kada se premaši potreban toplinski tok, a pražnjenje kada toplinski tok iz kolektorskog polja više nije dovoljan i za ovaj slučaj traje oko tri sata, a inače dok se ne isprazni.

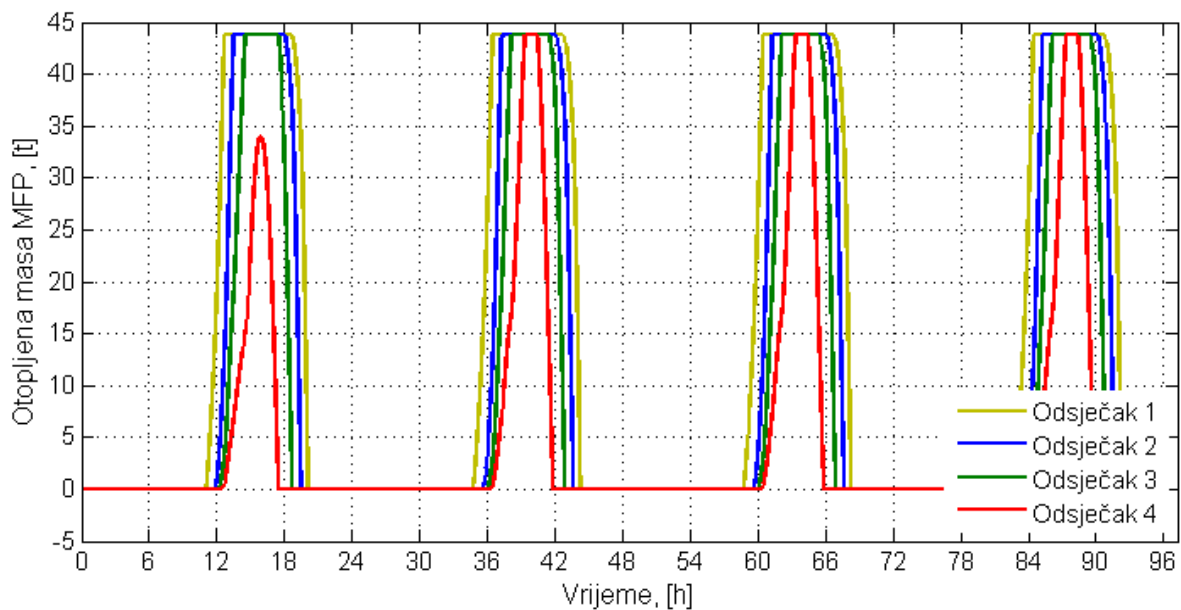
## **5.2. Tjedni rad latentnog spremnika sa solarnom elektranom**

Za simulaciju tjednog rada elektrane koristit će se kao predložak dijagram dnevnog sunčevog zračenja te njegovim varijacijama će se pokušati simulirati neke vremenske promjene tokom tjedna. Radna karakteristika turbine i generatora pare nije poznata, ali iz podataka dobivenih iz završnog rada [8] mogu se postaviti određena ograničenja za rad spremnika:

- Pregrijana para radnog fluida na izlazu iz generatora pare ima temperaturu 211 °C i za ostvarenje tog pregrijanja potrebna je temperatura ogrjevnog ulja barem 250 °C. Radni fluid isparava na 173 °C, a kako se ekspanzijom suhozasićene pare te temperature isparavanja ne ulazi u područje vlažne pare teoretski bi turbina mogla raditi i s tom ulaznom temperaturom. No, uzima se da turbina može normalno raditi s ulaznom temperaturom pare od 180 °C, tj. s ulaznom temperaturom ogrjevnog fluida od 220 °C i tokom cijelog tog rada generator treba punu snagu.
- Spremnik se počinje puniti kada se stvori višak topline u kolektorskom polju, a počinje se prazniti prvog trenutka kada toplinski tok iz kolektorskog polja više nije dovoljan za maksimalnu snagu generatora pare.
- Spremnik se isprazni kada se izlazna temperatura ulja iz spremnika spusti na 220 °C. U svrhu toga napravljena je povratna veza u simulaciji koja prekida rad spremnika kada se izlazna temperatura ulja spusti na 220 °C.

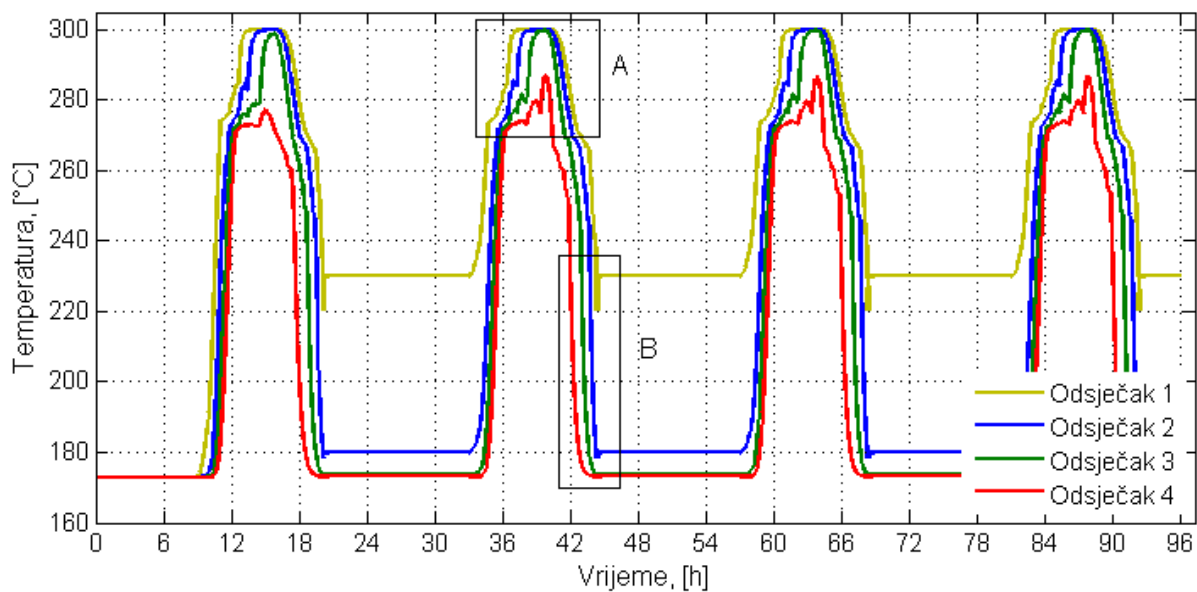
### **5.2.1. Tjedni rad bez poremećaja**

Na sljedećim slikama prikazan je tjedni rad solarne termoelektrane spregnut sa spremnikom topline bez ikakvih poremećaja. Tjedni rad traje sedam dana ali zbog periodičnog ponavljanja rezultata već nakon drugog dana, prikazana su samo četiri radna dana zbog preglednijeg prikaza.



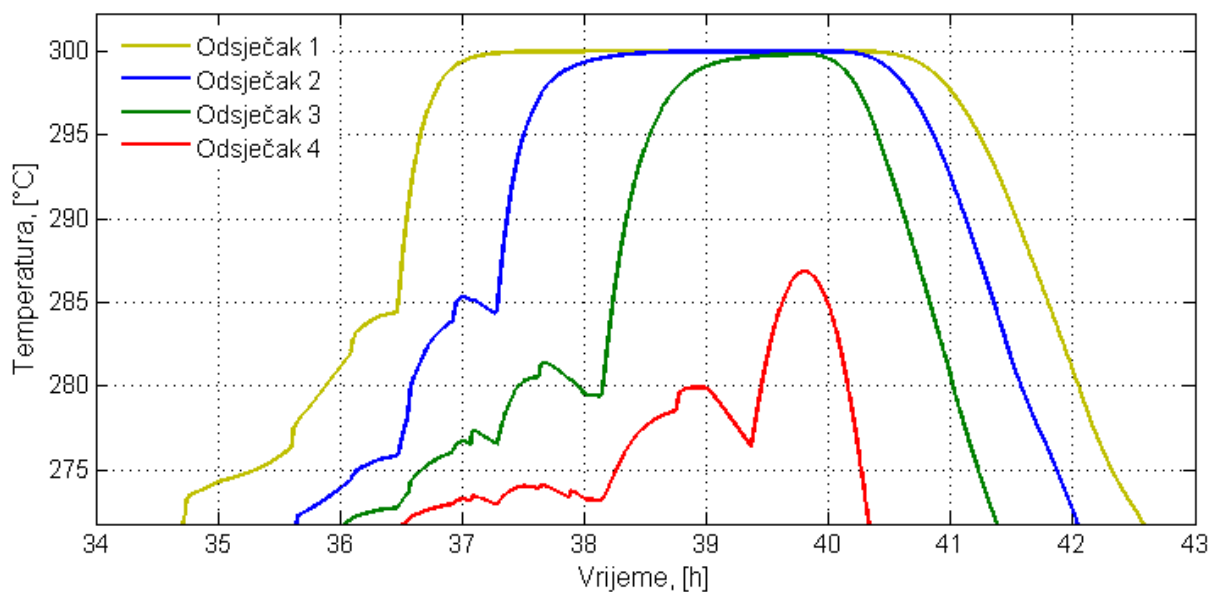
Slika 33. Količina otopljene mase PCM-a u vremenu

Prvog radnog dana se ne otopi sva masa zbog niže početne temperature, dok dalje to nije slučaj, jer je drugih dana početna temperatura viša i latentna toplina je maksimalno iskorištena.



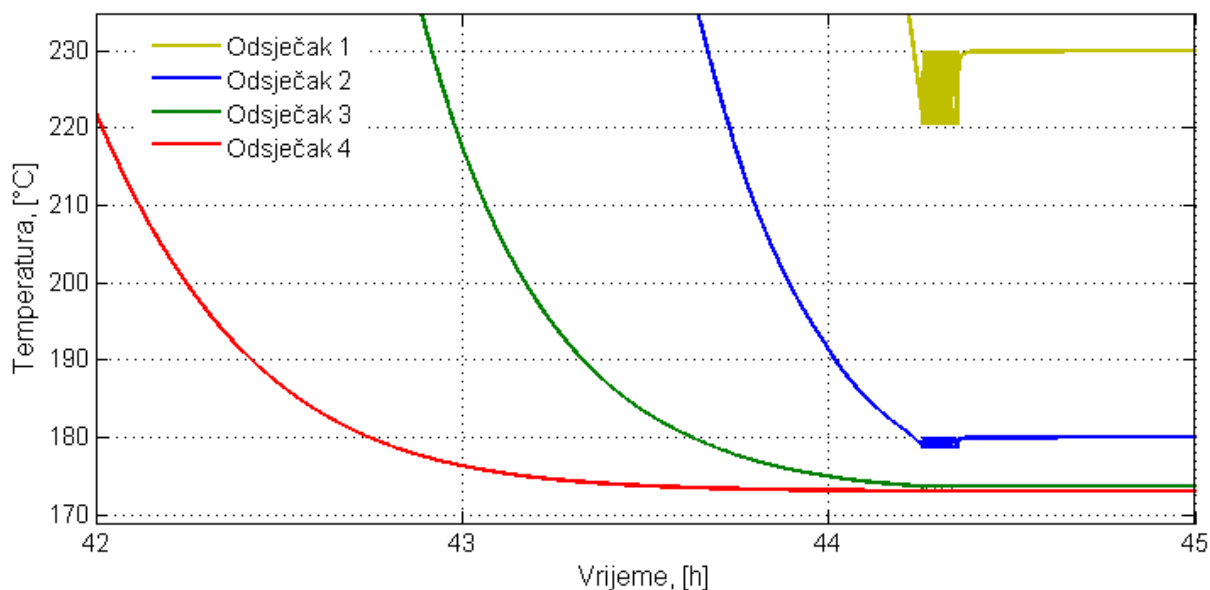
Slika 34. Promjena temperature ulja u vremenu

Zbog istih ulaznih podataka tokom cijelog radnog tjedan isti su odazivi za sve radne dane isključujući prvi.



Slika 35. Detalj A

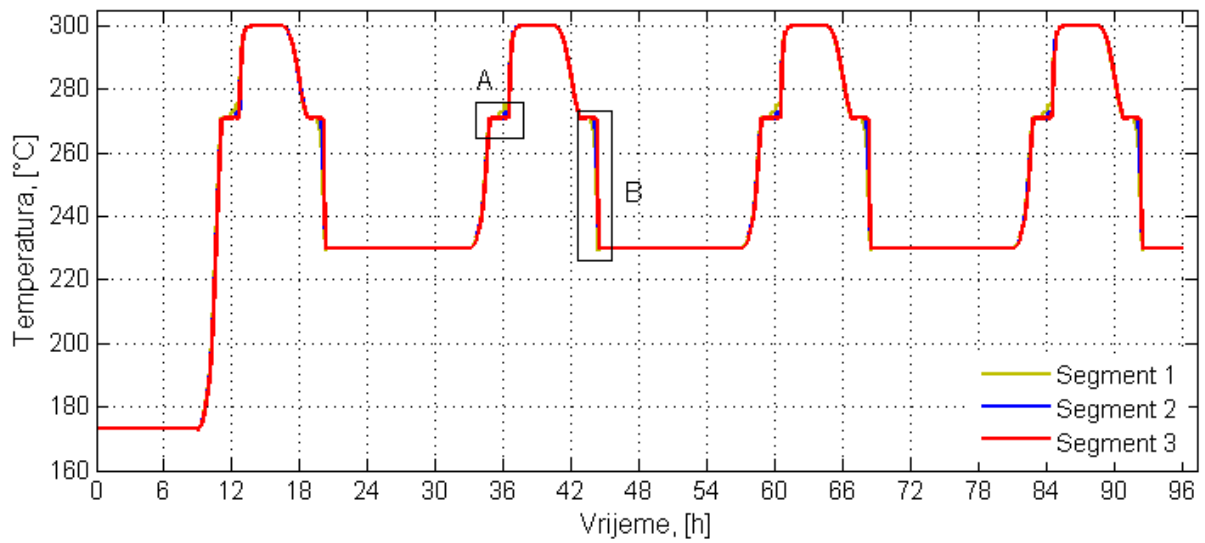
Ovakvi izraženi skokovi temperatura ulja su posljedica naglog prelaska s kondukcijskog na konvekcijski toplinski tok. Bili bi znatno glađi kada bi se taj prijelaz odvija kontinuirano, tj. kada bi postojala ovisnost otopljene mase o površini izmjene topline.



Slika 36. Detalj B

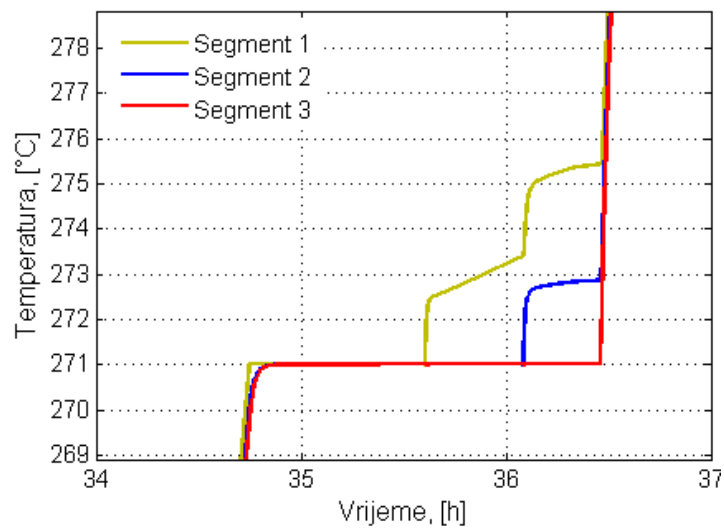
Detalj B prikazuje kraj rada spremnika topline. Podebljano područje je rezultat djelovanja povratne veze. Kada se izlazna temperatura ulja skoro spusti na 220 °C istog trena se prekida protok ulja. Naglo prestaje odlazni toplinski tok iz spremnika i temperatura u odsječku se počinje izjednačavati te zbog toga raste. Kada dosegne vrijednost od 230 °C opet započinje rad spremnika. Zbog jačeg odvođenja topline uljem nego dovođenja iz drugog segmenta taj se proces ponavlja određeni broj puta dok se ne izjednači temperatura u cijelom

odsječku i konačno obustavi rad spremnika. Stoga se taj proces na dijagramu vidi kao podebljano područje.

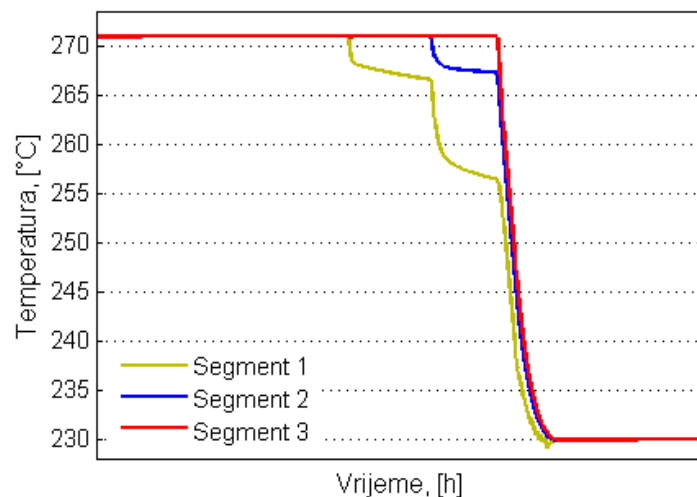


Slika 37. Promjena temperature PCM-a u prvom odsječku

Pošto je prvi odsječak prvi na udaru ogrjevnog fluida prvi se pregrijava i najmanje se ohladi zbog ograničenja.

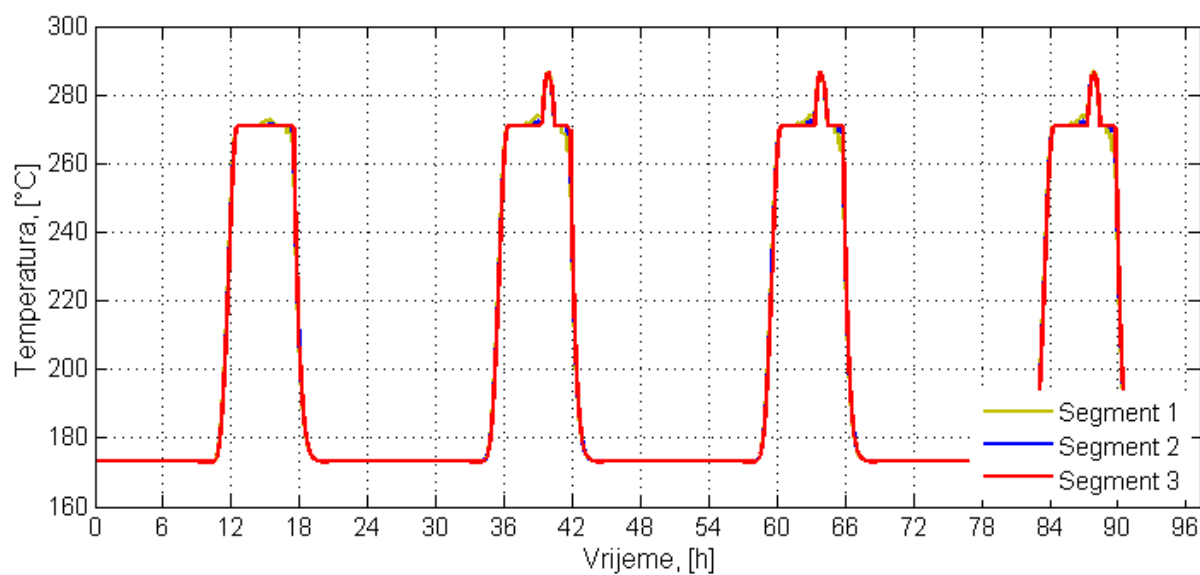


Slika 38. Detalj A



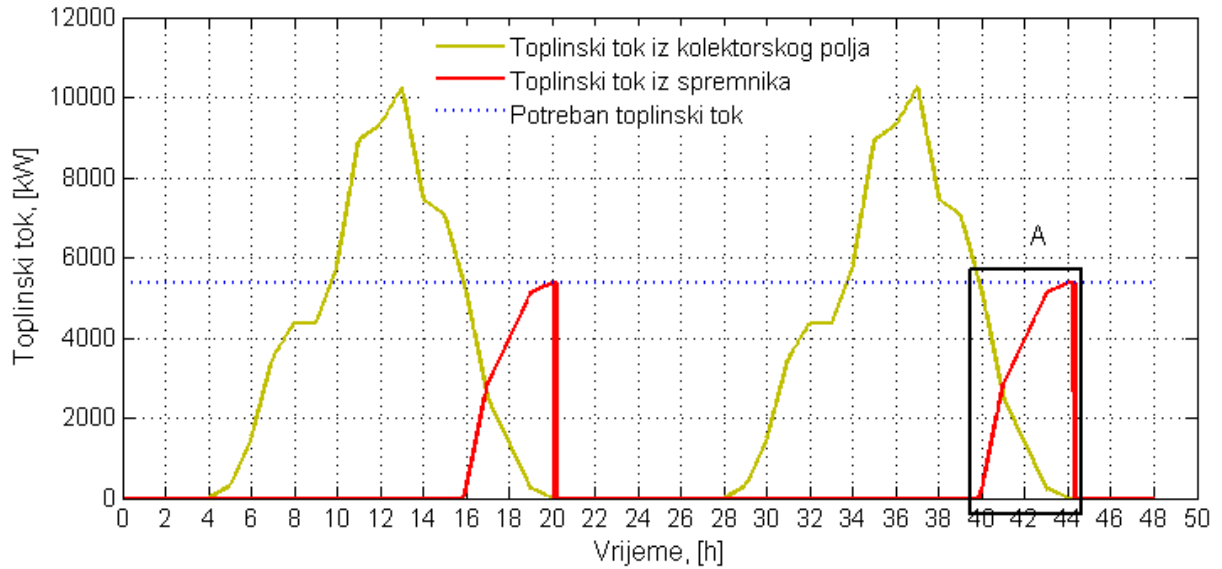
Slika 39. Detalj B

Proces se bitno ne razlikuje od dnevnog rada stoga detalje nije potrebno dodatno pojašnjavati jer je očita vizualna sličnost.

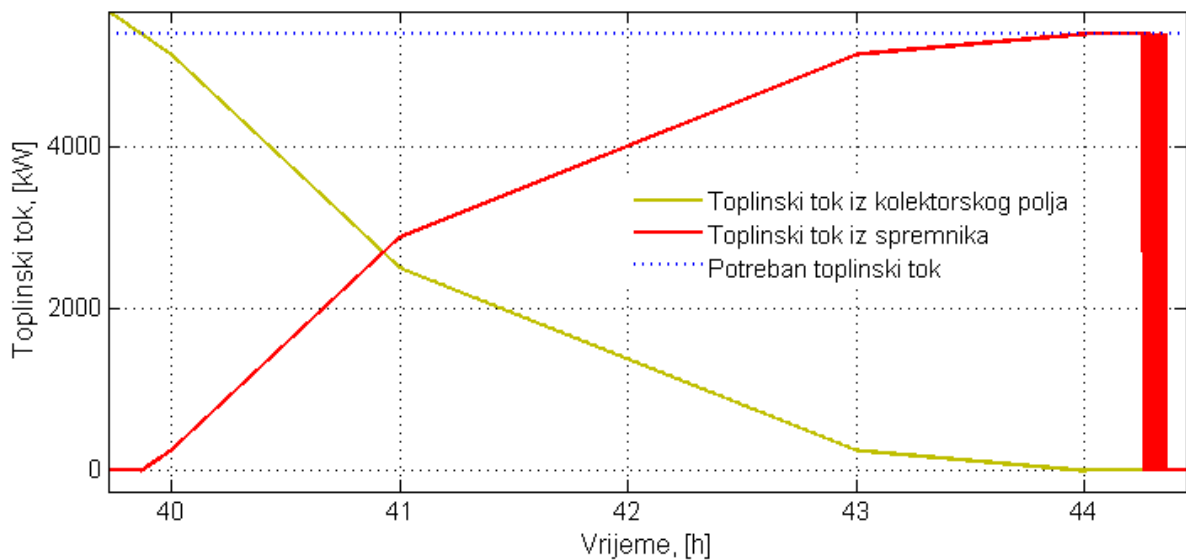


Slika 40. Promjena temperature PCM-a u četvrtom odsječku

Kako se prvog radnog dana spremnik počinje puniti s niže temperature, u četvrtom odsječku se talina neznajno pregrijava. Zbog ograničenja na izlaznu temperaturu spremnik se prilikom pražnjenja ne ohladi na početnu temperaturu, tj. u njemu ostane nešto pohranjene topline za sljedeći dan te sljedećih dana dolazi do većih pregrijanja četvrtog odsječka.

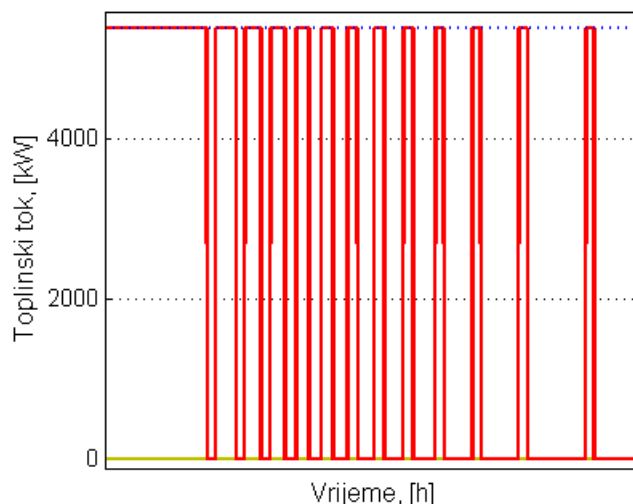


Slika 41. Promjena toplinskog toka iz kolektora i iz spremnika



Slika 42. Detalj A

Koristeći svu toplinu spremnika, elektrana produkuje svoj rad za više od 4 sata što može izgledati kao da je predimenzionirana, no to je zbog postojanja toplinskog toka iz kolektorskog polja. S povećanjem kolektorskog polja za 34 % prvo što se produkuje normalni rad za dva sata, a zbog spremnika za dodatnih 4 sata, dakle rad elektrane se produkuje 150 % što bi mogla biti vrlo isplativa investicija.



Slika 43. Uvećani prikaz završetka korištenja spremnika

Ovdje se uvećava kraj rada spremnika, a slični odazivi vrijede i za odsječke s uljem. Takav rad s naglim promjenama nije nimalo poželjan i kod vođenja elektrane bi trebalo koristiti neku sofisticiraniju metodu regulacije. No, ovakav tip regulacije u napravljenoj simulaciji uspješno na jednostavan način regulira početak i kraj punjenja spremnika, a tako i kraj pražnjenja spremnika iako su kriteriji različiti.

## 5.2.2. Tjedni rad s poremećajima

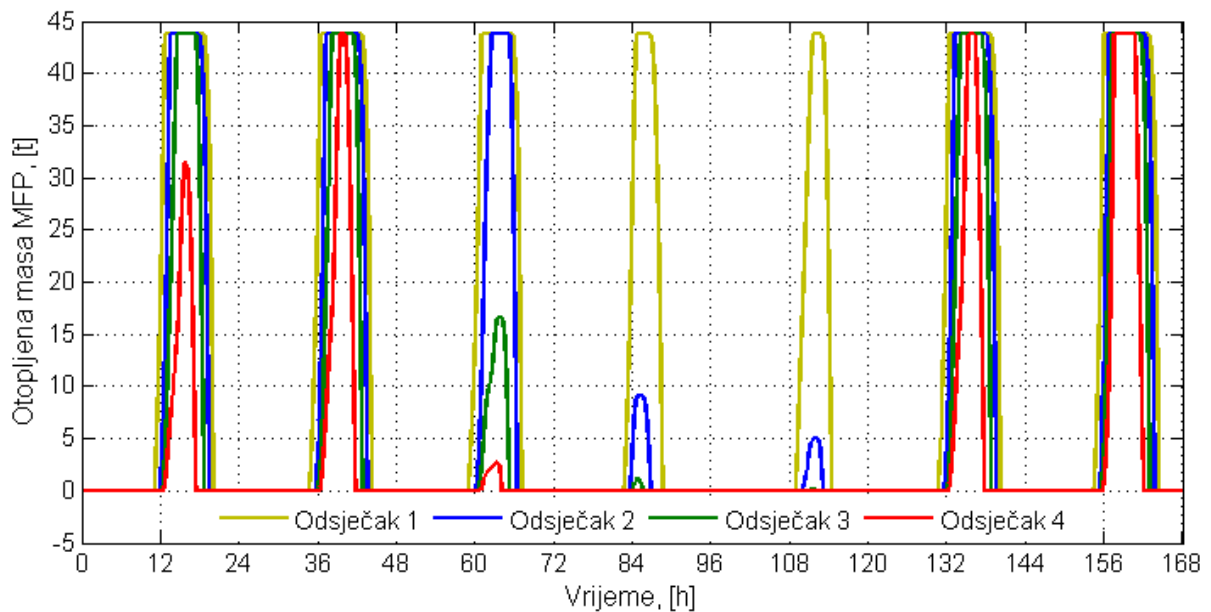
Biti će uvedeni proizvoljni poremećaji tokom tjednog rada elektrane:

- Prva dva dana neće biti poremećaja, tj. intenzitet zračenja će biti isti kao i za dimenzioniranje spremnik
- Treći dan svo zračenje će biti umanjeno za 10% što će predstavljati slabu naoblaku
- Četvrti dan će intenzitet zračenja biti nepromijenjen do 12 sati, a onda će biti smanjeno za 50%, što predstavlja jaču naoblaku
- Peti dan neće biti zračenja do 12 sati, a nakon toga će kroz sat vremena narasti na nominalnu vrijednost
- Šesti dan neće biti promjene u zračenju, ali prilikom pražnjenja neće biti uračunat toplinski tok iz kolektorskog polja
- Sedmi dan će zračenje biti uvećano za 10%

Poremećaji su bazirani samo na intenzitetu zračenja. Nisu razmatrane nagle promjene u protoku i temperaturi ogrjevnog fluida te promjene u radu generatora pare i turbine, jer nije poznat njihov rad pa ne bi imalo smisla pretpostavljati takve promjene. Štoviše, uzeto je da je izlazna temperatura iz kolektorskog polja konstantna te se promjenom masenog protoka regulira toplinski tok što znači da se promjenom intenziteta zračenja posredno ispituje i rad spremnika na promjene masenog protoka. Ukoliko bi se pak simulirale nagle promjene u radu

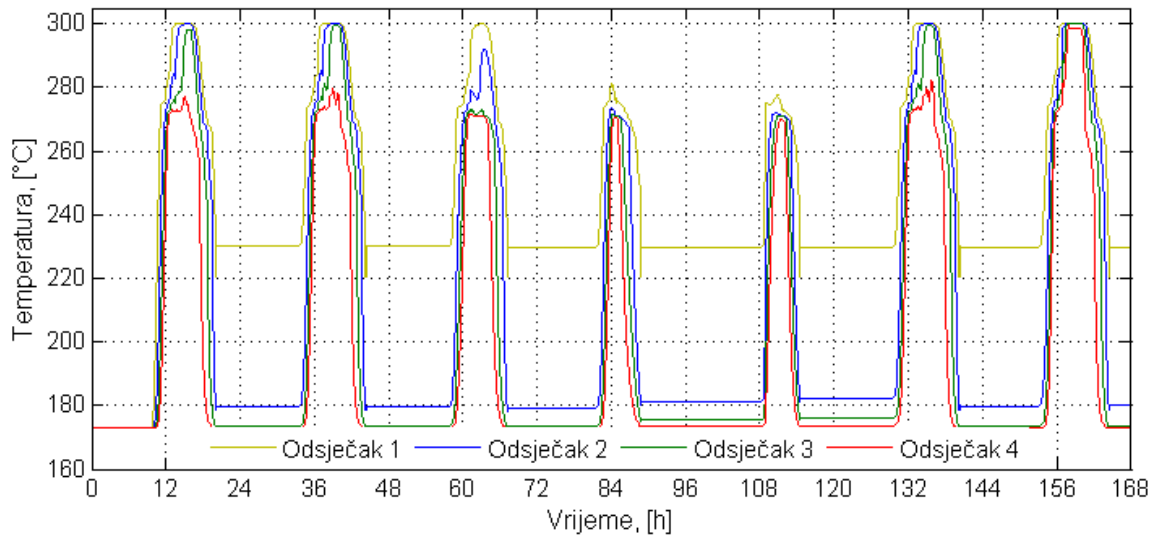


generatora pare i turbine onda bi bilo zgodno pratiti i proizvedenu električnu energiju, no u simulaciji nisu napravljeni blokovi koji bi ispisivali proizvodnju električne energije i nisu poznata ponašanja tih komponenata. Dakle, nema potrebe ispitivati ovako napravljenom simulacijom takve promjene, ali je ostavljena mogućnost da se ugrade karakteristike generatora pare i turbine te da se proširi područje promatranja promjena u radu elektrane iako bi bilo bolje da se ova simulacija ugradi u konfiguraciju elektrane jer bi to bio logičniji tijekom nadogradnje elektrane.

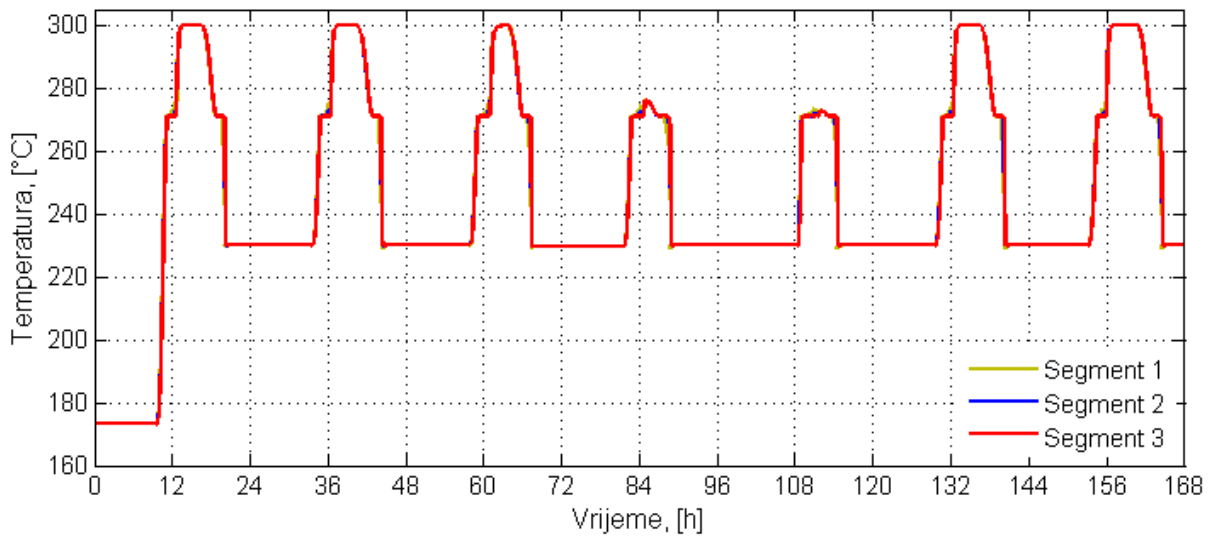


Slika 44. Promjena otopljene mase

Za prva dva dana već su objašnjeni odazivi u prethodnim poglavljima. Trećeg dana uz samo smanjenje zračenja za 10 % već se nije otopilo oko 25 % ukupne mase. Uz smanjenje zračenja za 50 % jedva da se je otopilo 30 % mase. Ostala toplina je pohranjena kao osjetna, ali na nižoj temperaturi od temperature taljenja te je manje vrijedna jer se tada postižu niži parametri pare radnog fluida. Povećanje zračenja ne utječe značajnije na rad spremnika jer se ne može pohraniti dodatni višak topline.

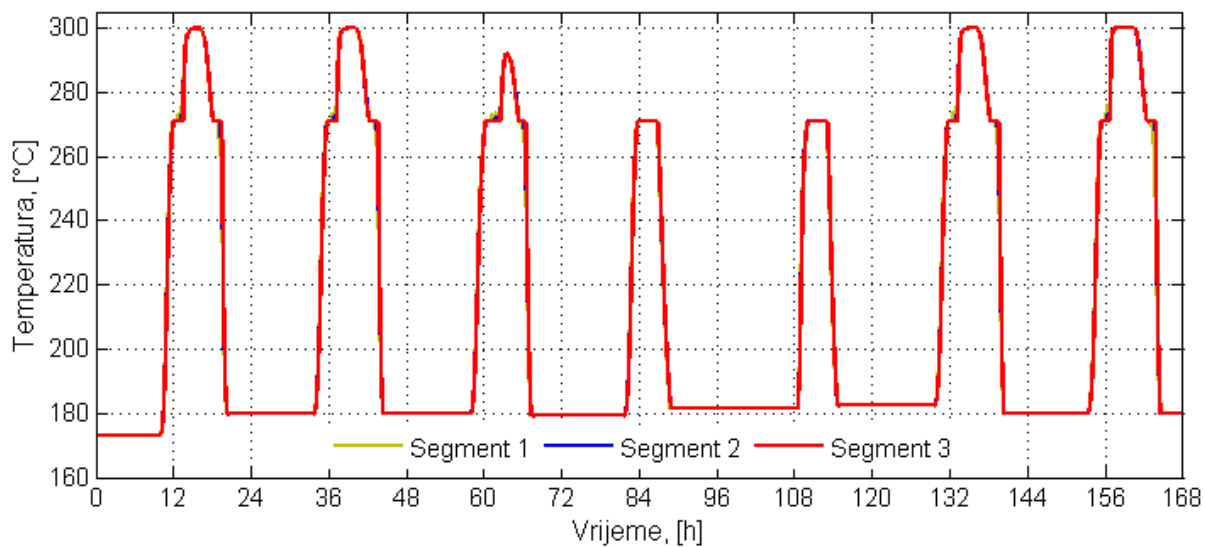


Slika 45. Izlazna temperatura ulja

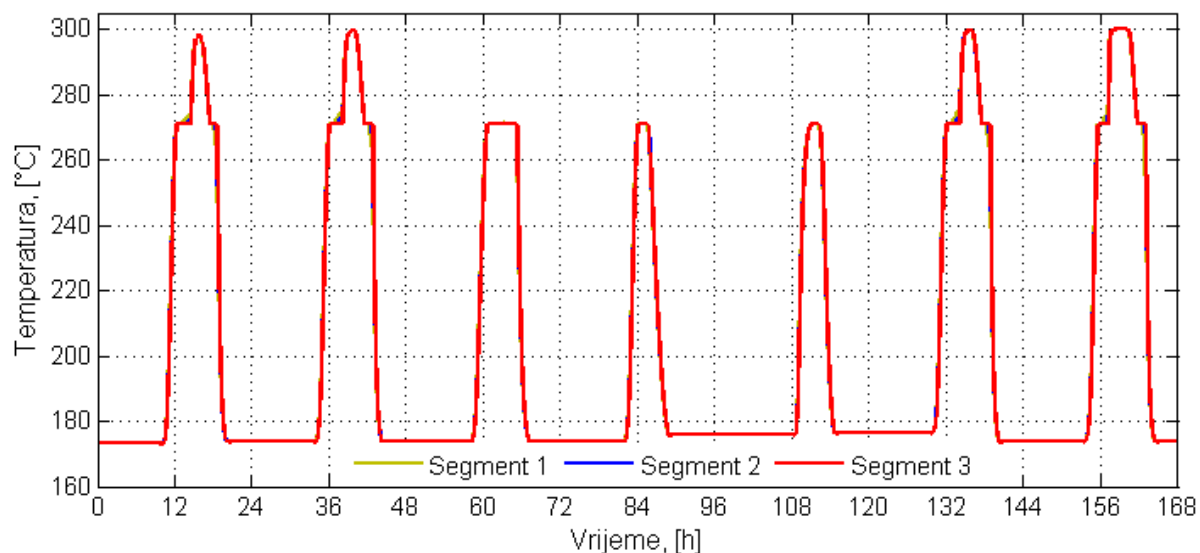


Slika 46. Temperature PCM-a u prvom odsječku

Promjene u četvrtom i petom danu toliko utječu na punjenje da skoro i ne dolazi do pregrijanja PCM-a u prvom odsječku.

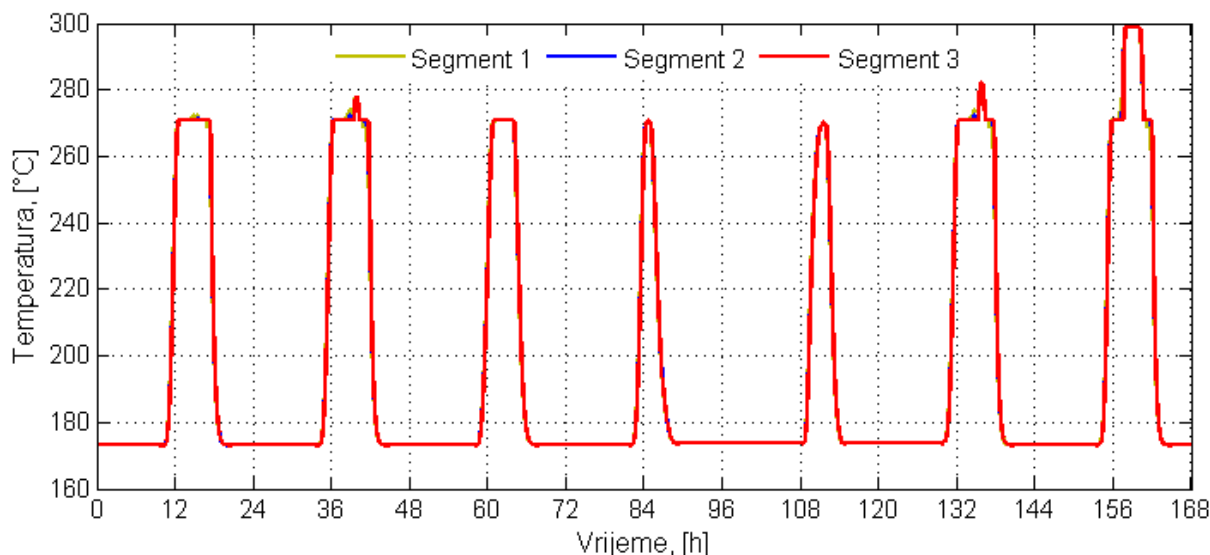


Slika 47. Temperature PCM-a u drugom odsječku



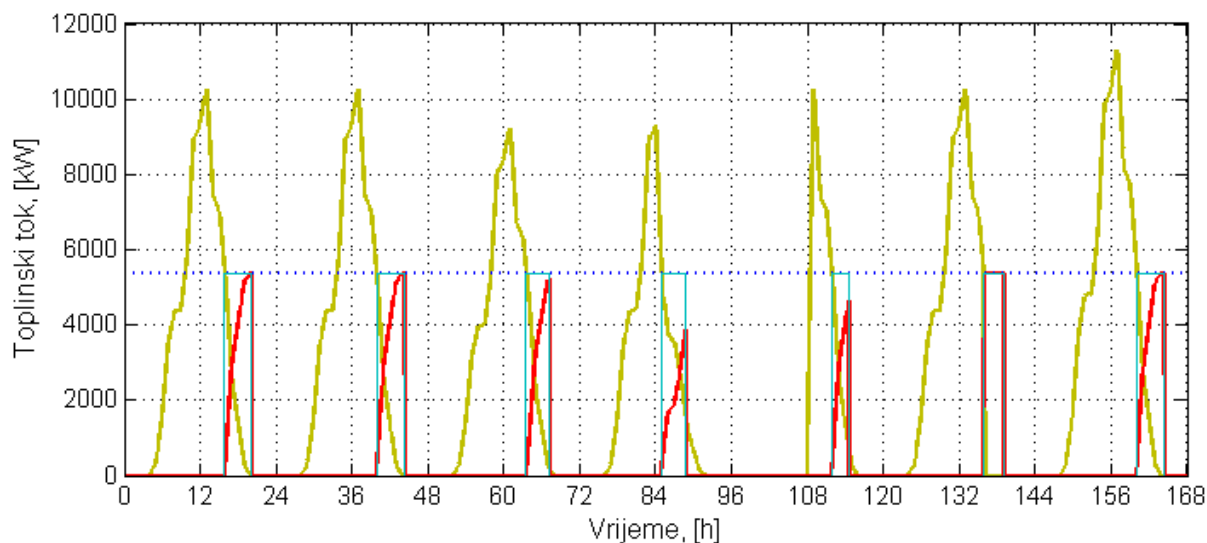
Slika 48. Temperature PCM-a u trećem odsječku

Drugi i treći odsječak još više osjećaju slabljenje dolaznog toplinskog toka pa skoro i nema pregrijanja taline.



Slika 49. Temperature PCM-a u četvrtom odsječku

U četvrtom odsječku do značajnijeg pregrijanja dolazi tek u sedmom danu kada se poveća zračenje. To je za očekivati, a i poželjno jer znači da je spremnik dobro dimenzioniran.



Slika 50. Profili zračenja u tjednom radu i izlazni toplinski tok iz spremnika

Osim što je prikazano kako se je mijenjao profil zračenja, vidi se i rad spremnika. Unatoč slabijem punjenju spremnika, svakog dana je toplinski tok bio traženog iznosa što pokazuje svijetlo plava linija, jedino što nije omogućio maksimalne parametre pare što se pak vidi iz izlazne temperature ulja. U sljedećoj tablici je prikazano ostvareno produljenje rada tokom tjednog rada.

Tablica 7. Produljenje pogona

Radni dan	Produljenje pogona elektrane, [h]
1.	4,189
2.	4,369
3.	3,625
4.	3,803
5.	2,614
6.	3,139
7.	4,330

Jedino petog dana, kada nije bilo nikakvog zračenja do podneva nije ostvareno traženo produljenje rada od tri sata. Šestog dana prilikom pražnjenja nije bilo toplinskog toka iz kolektora i spremnik je bez problema izvršio svoju namjenu što se je i htjelo postići dimenzioniranjem. Zahvaljujući takvom odabiru spremnik i uz smanjenja toplinskog toka za 10 % može normalno raditi, a tako i cijela elektrana. Iako je time investicija veća, kao što se je i pretpostavilo, dobiva se veća inertnost rada elektrane što podiže upotrebljivost ovakvih tipova elektrana.

## 6. Zaključak

Solarnim termoelektranama ugradnjom spremnika topline znatno se poboljšavaju radne karakteristike, produljuje se pogon postrojenja, dobiva se veća inertnost na nagle neželjene promjene i veća sigurnost u radu. Pritom, latentni spremnik se pokazuje kao vrlo dobro rješenje, jer zbog visoke gustoće pohrane topline potreban je jedan relativno mali spremnik u usporedbi s uobičajenom konfiguracijom od dva osjetna spremnika. Latentni spremnik dimenzioniran u ovom radu potvrđuje važnost daljnjeg istraživanja ovakvog načina skladištenja topline, jer i najjednostavnija konfiguracija spremnika konkurira postojećim izvedbama osjetnih spremnika.

Matematički model latentnog spremnika je neovisan o geometrijskim karakteristikama samog spremnika te kako se je težište promatranja stavilo na dinamiku procesa energetske promjene odabrana je najjednostavnija geometrija spremnika, jer bi za optimiranje geometrije bilo poželjno simulirati i sliku strujanja materijala za pohranu topline, a što nije kratak i lagan zadatak.

Za izradu numeričkog modela odabran je Simulink jer se u njemu na relativno jednostavan i zoran način može izraditi postavljeni matematički model. Osim toga, model u Simulinku se može jednostavno nadograđivati i usavršavati, a i zorno se može vidjeti koji dio simulacije je slaba točka, tj. izaziva nestabilnost i greške simulacije. Napravljeni numerički model pokazuje da se u relativno jednostavnim programskim paketima može dobiti okvirna slika termodinamičkih procesa bez potrebnog poznavanja strujanja medija, a prednost je što je potrebno uložiti manje vremena za izradu modela i potrebno je manje računalnog rada za provedbu proračuna te se mogu brže ispitati određene promjene.

## 7. Dodatak

### 7.1. Matlab skripta

```
%-----Geometrija spremnika-----%
R1=0.0062;    % [m] unutarnji polumjer cijevi
R2=0.008;    % [m] vanjski polumjer cijevi
R3=0.02892;  % [m] polumjer volumena oko cijevi ispunjenog PCM-om
delta=(R3-R2)/3;

L=15;        % [m] duljina jedne cijevi
N=2165;     % broj cijevi

Mmax=175240; % [kg] maksimalna masa materijala s faznom pretvorbom u spremniku

%-----Svojstva materijala s faznom pretvorbom (MFP)-----%
ro=2168;     % [kg/m^3] gustoća
lmd=1;      % [W/(mK)] toplinska vodljivost
Tt=271;     % [°C] temperatura fazne pretvorbe
r=212000;   % [J/kg] latentna toplina
cp_k=1000;  % [J/(kgK)] specifični toplinski kapacitet krutine
cp_t=1300;  % [J/(kgK)] specifični toplinski kapacitet tekućine
hr=130700;  % [J/kg] pomoćna vrijednost

%-----Svojstva čeličnih cijevi-----%
ro_c=7850;   % [kg/m^3] gustoća čelika
lmd_c=53;   % [W/(mK)] toplinska vodljivost
c_c=461;    % [J/(kgK)] toplinski kapacitet čelika

%-----Pretpostavljeni koeficijenti prijelaza topline-----%
alfa_ulje=400; % [W/(m^2*K)] za prijelaz ulje stijenka
alfa_un=250;  % [W/(m^2*K)] slobodna konvekcija koja se pojavljuje prilikom otoapanja
MFP-a

%-----Ulazni parametri-----%
Tuu=300;     % [°C] temperatura ulja na izlazu iz kolektora, tj. na ulazu u GP i spremnik
cuu=2948;
Tui=173;     % [°C] temperatura ulja na izlazu iz GP
cui=2517.4;

T=173;       % [°C] početna temperatura cijelog spremnika

mgp=12;      % referentni maseni protok kroz gp
ro_u=700;    % prosječna gustoća ulja u radnom intervalu
fi_gp=5387000; % toplinski tok u gp

FI_5=312757-fi_gp;
FI_6=1501236-fi_gp;
FI_7=3505887-fi_gp;
FI_8=4378605-fi_gp;
```

```

FI_9=4378605-fi_gp;

FI_10=5817290-fi_gp; % toplinski tok iz kolektora u 10sati
FI_11=8944865-fi_gp;
FI_12=9320174-fi_gp;
FI_13=10258450-fi_gp;
FI_14=7443629-fi_gp;

FI_15=7068320-fi_gp; %toplinski tok iz kolektora u 15 sati
FI_16=5129223-fi_gp;
FI_17=-fi_gp+2502060;
FI_18=-fi_gp+1376133;
FI_19=-fi_gp+250206;

huu=Tuu*cuu;
hui=Tui*cui;

hpoc=cp_k*T-hr;
h1=cp_k*Tt-hr;
h2=cp_t*Tt;

tp=6;          % vrijeme punjenja

% -----Parametri po segmentima-----%
x=4;          % broj segmenata

Ms=(R22-R12)*pi*L*N*ro_c;      % masa cijevi
Mu=R12*pi*L*N*ro_u;          % masa ulja u cijevima

Mx=Mmax/x;
Msx=Ms/x;
Mux=Mu/x;

k=2*pi*L*N;
k1=k/(1/(R1*alfa_ulje)+(1/lmd_c*log(R2/R1)));
k2=k*lmd/log((R2+0.5*delta)/R2);
k3=alfa_un*k*(R2+0.5*delta);
k4=k*lmd/log((R2+1.5*delta)/(R2+0.5*delta));
k5=k/(1/((R2+delta)*alfa_un)+1/lmd*log((R2+1.5*delta)/(R2+delta)));
k6=alfa_un*k*(R2+1.5*delta);
k7=k*lmd/log((R2+2.5*delta)/(R2+1.5*delta));
k8=k/(1/((R2+2*delta)*alfa_un)+1/lmd*log((R2+2.5*delta)/(R2+2*delta)));
k9=alfa_un*k*(R2+2.5*delta);

```



Toplinski tok za tjedni rad

t=[0 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 24]\*3600;

fi=[0 0 312757 1501236 3502884 4378605 4378605 5817290 8944865  
9320174 10258450 7443629 7068320 5129223 2502060 1376133 250206 0 0];

fi\_do12=[0 0 312757 1501236 3502884 4378605 4378605 5817290 8944865 9320174];  
fi\_od12=[10258450 7443629 7068320 5129223 2502060 1376133 250206 0 0];

fi\_4=[fi\_do12 fi\_od12\*0.5];

fi\_5=[fi\_do12\*0 fi\_od12];

fi\_6=[0 0 312757 1501236 3502884 4378605 4378605 5817290 8944865  
9320174 10258450 7443629 7068320 5129223 0 0 0 0 0];

t\_6=[0 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16.01 17 18 19 20 24]\*3600;

simin=[t' fi'];

t'+24\*3600 fi';

t'+48\*3600 fi'\*0.9;

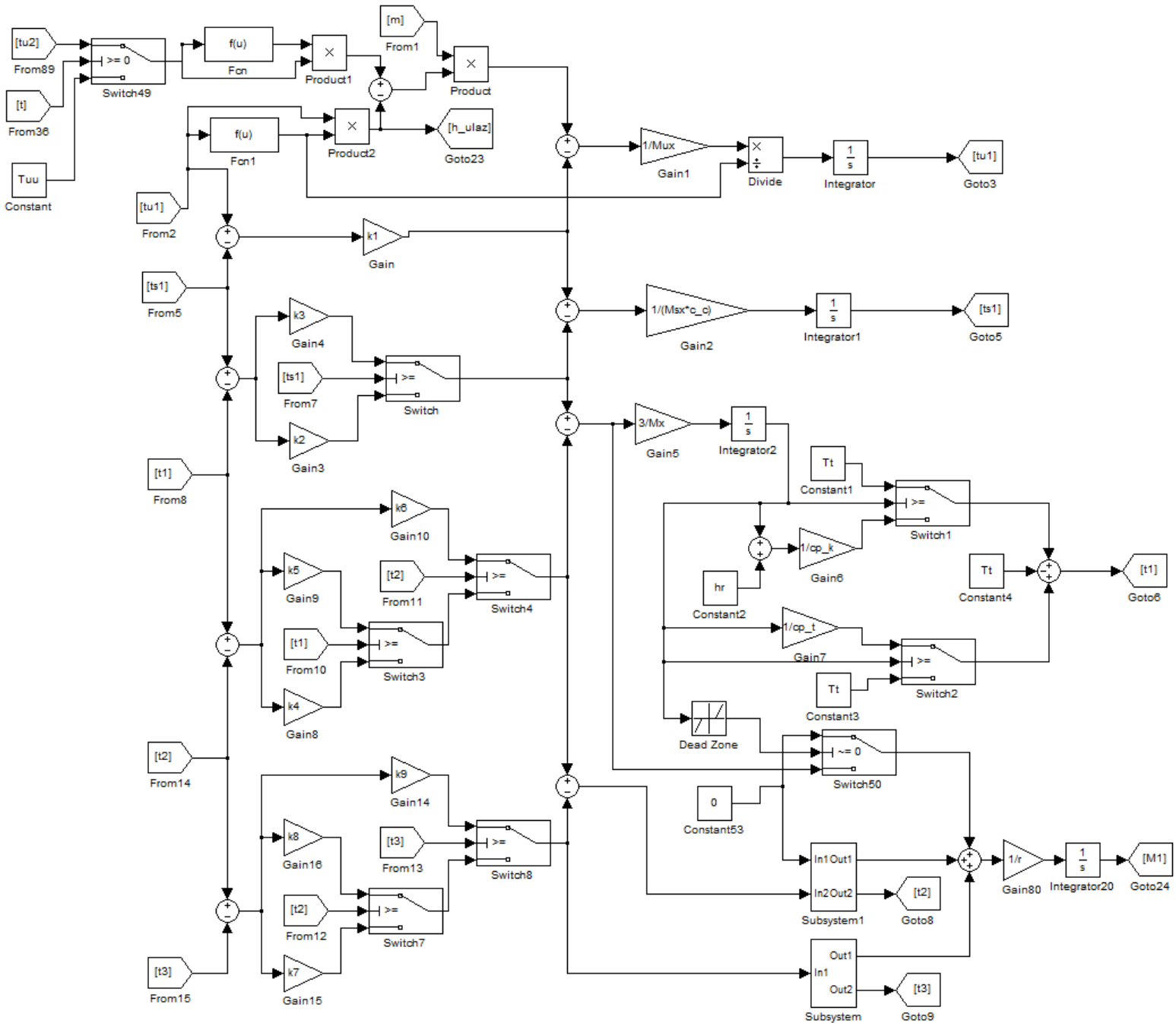
t'+72\*3600 fi\_4';

t'+96\*3600 fi\_5';

t\_6'+120\*3600 fi\_6';

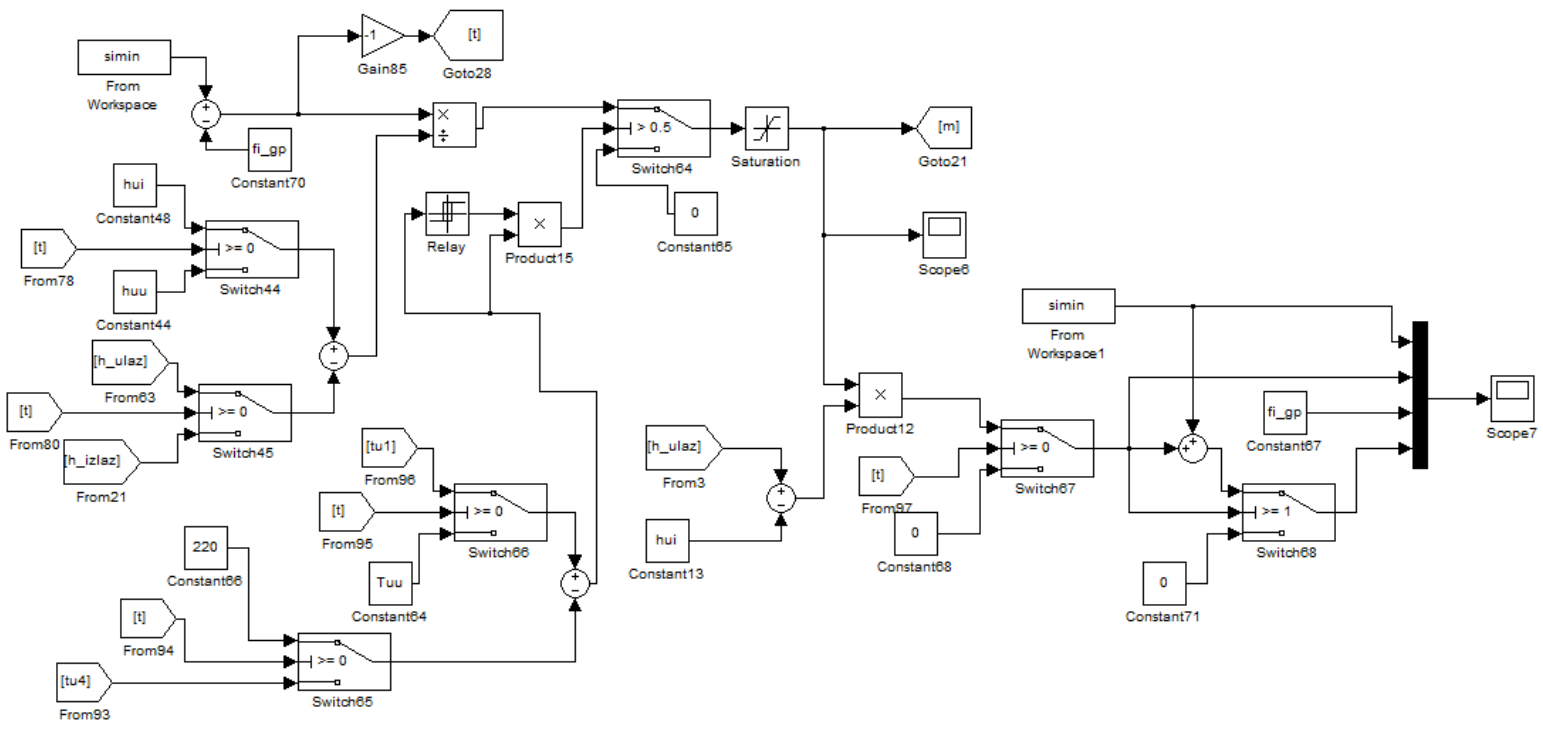
t'+144\*3600 fi'\*1.1];

## 7.2. Simulink model



Slika 51. Prvi odsječak referentne cijevi

Ostala tri odsječka se razlikuju samo po drugim oznakama za temperature.



Slika 52. Povratna veza koja određuje protok ulja kroz referentnu cijev

## Literatura

- [1] Organic Rankine cycle - Wikipedia, the free encyclopedia.htm  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Organic\\_Rankine\\_cycle](http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_Rankine_cycle) , datum pristupa: 5. 5. 2014.
- [2] Tian Y., Zhao C.Y., A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications, Applied Energy, 2013., broj časopisa 104, stranica 538-553
- [3] Spremnici topline - Wikipedija.htm, [http://hr.wikipedia.org/wiki/Spremnici\\_topline](http://hr.wikipedia.org/wiki/Spremnici_topline), datum pristupa: 15.2.2014.
- [4] Kuravi S., Trahan J., Yogi Goswami D., Rahman M. M., Stefanakos E. K., Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, Progress in Energy and Combustion Science, broj časopisa 39, stranica 285-319
- [5] ENERGETSKE TRANSFORMACIJE - Enerpedia.htm,  
[http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE\\_TRANSFORMACIJE](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE), datum pristupa: 14.2.2014.
- [6] DLR Portal - Solar thermal power plants Over 500 experts expected at leading conference in Berlin.htm, [http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-5105/8598\\_read-19485/8598\\_page-2/gallery-1/gallery\\_read-Image.1.10817/](http://www.dlr.de/en/desktopdefault.aspx/tabid-5105/8598_read-19485/8598_page-2/gallery-1/gallery_read-Image.1.10817/) datum pristupa: 22.8.2014.
- [7] Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, svezak 13, Zagreb 1997., stranica 25-26
- [8] Močibob J., Model male solarne termoelektrane s organskim Rankineovim ciklusom, FSB, Zagreb, 2010.
- [9] Longeon M., Soupart A., Formigué J-F., Bruch A., Marty P., Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, Applied Energy, 2013., broj časopisa 112, stranica 175-184
- [10] Research, David Dunand Research Group, Northwestern University.htm  
<http://dunand.northwestern.edu/research/index.shtml> , datum pristupa 25.8.2014.
- [11] Category Metal foam - Wikimedia Commons.htm  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Metal\\_foam](http://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Metal_foam) , datum pristupa 25.8.2014.
- [12] Phase-change material - Wikipedia, the free encyclopedia.htm,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change\\_material](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material) datum pristupa: 18.2.2014.
- [13] Archimede Solar Energy.htm  
[http://www.archimedesolarenergy.it/molten\\_salt.htm](http://www.archimedesolarenergy.it/molten_salt.htm) datum pristupa: 24.8.2014.

[14] Pyro.co.za.htm

<http://www.pyrometallurgy.co.za/> datum pristupa: 24.8.2014.

[15] Krautov strojarski priručnik, 2009

[16] A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering Online - Home.htm, <http://www.thermopedia.com/content/841/> datum pristupa: 18.2.2014.

[17] How SolarWall PV\_T Works - Explanation of the SolarWall (solar thermal) air heating and PV electricity hybrid co-generation systems, how they provide increased PV efficiency and fresh solar heated ventilation air for industrial and commercial buildings.htm,

<http://solarwall.com/en/products/pythermal/how-pvt-works.php> datum pristupa 22.8.2014.