

Usporedba učinkovitosti različitih tipova geotermalnih elektrana

Beštak, Tomislav

Master's thesis / Diplomski rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:604060>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-25**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

**USPOREDBA UČINKOVITOSTI RAZLIČITIH TIPOVA GEOTERMALNIH
ELEKTRANA**

Diplomski rad

Tomislav Beštak

N285

Zagreb, 2019.

USPOREDBA UČINKOVITOSTI RAZLIČITIH TIPOVA GEOTERMALNIH ELEKTRANA

TOMISLAV BEŠTAK

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Sažetak

Geotermalne elektrane za proizvodnju električne energije koriste zemljinu toplinsku energiju, koja je obnovljiva, te time geotermalna energija spada u obnovljive izvore energije. U novije doba, u svijetu se bilježi značajan rast instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana. Postoji nekoliko vrsta geotermalnih elektrana, no tri tipa postrojenja su najvažnija jer se najviše koriste u svijetu; to su postrojenje s procesom suhe pare, postrojenje s procesom jednostrukog isparavanja i postrojenje s binarnim ili organskim Rankine-ovim procesom (ORC). U ovom diplomskom radu prikazan je matematički model energetske proračuna za sva tri tipa geotermalnih elektrana, te je izvedena analiza slučaja kako bi se sva tri tipa postrojenja usporedila prema učinkovitosti konverzije i proizvedenoj snazi električne energije. Za analizu slučaja su korišteni djelomično identični ulazni podaci kako bi usporedba bila relevantna.

Ključne riječi: geotermalna elektrana, binarne elektrane, proces s jednostrukim isparavanjem, procesa suhom parom

Diplomski rad sadrži: 39 stranica, 20 grafičkih priloga, 2 slike, 3 tablice, 23 reference

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta,
Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF-a

Ocjenjivači: Dr. sc. Luka Perković, docent RGNF-a

Dr. sc. Tomislav Kurevija, docent RGNF-a

Dr. sc. Domagoj Vulin, izvanredni profesor RGNF-a

Datum obrane: 20. rujna 2019., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

COMPARISON OF EFFECTIVENESS OF DIFFERENT TYPES OF GEOHERMAL POWER PLANTS

Tomislav Beštak

Abstract

Geothermal power plants use geothermal heat which is renewable for electricity generation. Therefore, geothermal energy belongs to the category of renewable energy. Recently, a significant increase of installed capacity of geothermal power plants has been recorded worldwide. There are several types of geothermal plants, but three types are most important because they are most commonly used. These are: dry steam power plants, single flash power plants and binary power plants. In this Master's thesis mathematical model for each of the three types of geothermal power plants is presented and a case analysis is conducted in order to compare all three types of geothermal plants according to the conversion efficiency and generated electricity power. In order for that comparison to be relevant, partially identical input data is used in case analysis.

Keywords: geothermal power plants, binary cycles, single-flash process, dry steam process

Thesis contains: 39 pages, 20 graphic attachments, 2 figures, 3 tables and 23 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,

Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Luka Perković, PhD

Reviewers: Assistant Professor Luka Perković, PhD

Associate Professor Tomislav Kurevija, PhD

Associate Professor Domagoj Vulin, PhD

Date of defense: September 15, 2019, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ:

| | |
|--|----------|
| POPIS GRAFIČKIH PRILOGA | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA | II |
| POPIS KORIŠTENIH JEDINICA S DIMENZIJAMA | III |
| POPIS KORIŠTENIH OZNAKA | IV |
| 1. UVOD | 1 |
| 2. PREGLED TIPOVA GEOTERMALNIH ELEKTRANA..... | 2 |
| 2.1. Proces suhe pare | 2 |
| 2.2. Proces sa isparavanjem (jednostrukim, dvostrukim ili trostrukim) | 4 |
| 2.3. Binarni proces | 6 |
| 2.4. Napredni geotermalni sustavi (EGS) | 8 |
| 3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA UČINKOVITOST GEOTERMALNIH ELEKTRANA | 9 |
| 3.1. Udio netopljivih plinova | 10 |
| 3.2. Parazitsko opterećenje | 11 |
| 3.3. Gubitak topline | 11 |
| 3.4. Učinkovitost turbine | 12 |
| 3.5. Učinkovitost generatora..... | 12 |

| | |
|---|-----------|
| 4. MATEMATIČKI MODEL ZA TRI OSNOVNA TIPA GEOTERMALNIH ELEKTRANA..... | 14 |
| 4.1. Matematički model procesa suhe pare..... | 14 |
| 4.2. Matematički model procesa s jednostrukim isparavanjem | 19 |
| 4.3. Matematički model binarnog procesa..... | 24 |
| 5. ANALIZA SLUČAJA I REZULTATA..... | 31 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 34 |
| 7. LITERATURA | 38 |

POPIS GRAFIČKIH PRILOGA

| | |
|---|----|
| Grafički prilog 2-1. Shema procesa sa suhom parom..... | 3 |
| Grafički prilog 2-2. Shema procesa sa jednostrukim isparavanjem | 4 |
| Grafički prilog 2-3. Proces s dvostrukim isparavanjem | 5 |
| Grafički prilog 2-4. Proces s trostrukim isparavanjem..... | 6 |
| Grafički prilog 2-5. Shema binarnog procesa..... | 7 |
| Grafički prilog 4-1. T-s dijagram radnog procesa za H ₂ O pri procesu suhe pare | 16 |
| Grafički prilog 4-2. p-h dijagram radnog procesa za H ₂ O pri procesu suhe pare | 16 |
| Grafički prilog 4-3. ACHE mapa za H ₂ O..... | 18 |
| Grafički prilog 4-4. T-s dijagram radnog procesa za H ₂ O u procesu s jednostrukim isparavanjem..... | 22 |
| Grafički prilog 4-5. p-h dijagram radnog procesa za H ₂ O u procesu s jednostrukim isparavanjem..... | 22 |
| Grafički prilog 4-6. Određivanje tlaka kvalitativnom analizom..... | 25 |
| Grafički prilog 4-7. T-s dijagram radnog procesa za izobutan pri ORC procesu..... | 27 |
| Grafički prilog 4-8. p-h dijagram radnog procesa za izobutan pri ORC procesu..... | 28 |
| Grafički prilog 4-9. Iterativni postupak određivanja $q_{m,ORC}$ | 29 |
| Grafički prilog 4-10. ACHE mapa za H ₂ O..... | 30 |
| Grafički prilog 5-1. Učinkovitost konverzije različitih tipova geotermalnih elektrana | 33 |
| Grafički prilog 5-2. Neto proizvedena snaga električne energije različitih tipova geotermalnih elektrana | 33 |
| Grafički prilog 5-3. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s procesom suhe pare | 34 |
| Grafički prilog 5-4. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s jednostrukim isparavanjem | 35 |
| Grafički prilog 5-5. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s binarnim procesom..... | 36 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 2-1. Parna turbina | 7 |
| Slika 5-1. Isječak proračuna iz programa „Python“ | 32 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 3-1. Prikaz učinkovitosti različitih generatora..... | 13 |
| Tablica 5-1. Ulazni podaci za sva tri tipa geotermalnih elektrana | 31 |
| Tablica 5-2. Prikaz izračunatih rezultata za sva tri tipa geotermalnih elektrana..... | 32 |

POPIS KORIŠTENIH JEDINICA S DIMENZIJAMA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|-----------------|------------------|------------------|
| p | bar | tlak |
| P _{th} | kW _{th} | termalna snaga |
| P _{el} | kW _e | električna snaga |
| P _{el} | MW _e | električna snaga |
| h | kJ/kg | entalpija |
| T | °C | temperatura |
| | km | kilometar |
| q _m | kg/s | maseni protok |

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

| | |
|-----|----------------------------|
| SAD | Sjedinjene Američke Države |
| ORC | organski rankine-ov proces |

1. UVOD

U svijetu se bilježi značajan rast instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana. Pretpostavlja se da je ukupno u 2015. godini bilo instalirano 18500 MWe, što predstavlja rast od 73% u odnosu na 2010. (Bertani, 2010.), a sličan trend se bilježi i sve do danas.

Proizvodnju električne energije iz geotermalnih elektrana karakteriziraju visoka početna ulaganja (fiksni troškovi), dok su varijabilni troškovi relativno niski. Proizvodnja se odvija gotovo neprekinuto (osim za vrijeme remonta), stoga se geotermalne elektrane uobičajno koriste kao elektrane za pokrivanje baznog opterećenja (AGEA, 2010.).

Učinkovitost konverzije geotermalnih elektrana je omjer neto proizvedene snage električne energije (kWe) i proizvedene snage toplinske energije iz ležišta (kWth). Najčešće se uzima u obzir daje prosječna učinkovitost konverzije geotermalnih elektrana oko 10% (IEA, 2007.). Prema autoru (Barbieru, 2002.) učinkovitost geotermalnih elektrana je između 10 i 17%. Nadalje autori (Dickson i Fanelli, 2003.) navode primjer geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem koja ima učinkovitost 18%, pri ulaznom tlaku od 6,5 bara. Na primjer, geotermalna elektrana binarnog tipa Chena Hot Springs na Aljaski (Aneke et al., 2011.), ima učinkovitost od samo 1% zbog prosječne entalpije proizvedenog fluida od 306 kJ/kg i temperature od 73°C, dok geotermalna elektrana Darajat u Indoneziji ima učinkovitost od 20,7% (Kaya et al., 2011.). Stoga se može zaključiti kako svaka geotermalna elektrana ima svoju učinkovitost koja ovisi o tipu elektrane i o brojnim ostalim čimbenicima, koji će biti navedeni u jednom od slijedećih poglavlja.

Cilj ovog rada je usporediti učinkovitost konverzije i proizvedenu snagu električne energije tri najučestalija tipa geotermalnih elektrana, pri čemu će se napraviti matematički model i analiza slučaja za sva tri tipa geotermalnih elektrana, gdje će neki od ulaznih podataka biti identični kod svakog tipa elektrana kako bi se mogla napraviti usporedba.

2. PREGLED TIPOVA GEOTERMALNIH ELEKTRANA

Najviše tipova geotermalnih elektrana trenutno dostupnih je dizajnirano za eksploataciju konvencionalnih geotermalnih sustava (hidrotermalni sustavi). Proces odabira najviše odgovarajućeg tipa u suštini ovisi o svojstvima geotermalnih resursa, geotermalnog fluida i ležišta, koje će biti eksploatirano. Najvažnija svojstva su geološka, kemijska, fizička i termodinamička (Gupta et al., 2007.).

Prema autoru (Lund, 2007.), geotermalni resursi pogodni za proizvodnju električne energije mogu biti podijeljeni u tri osnovne grupe:

1. sustavi s dominantnim udjelom pare i temperaturom većom od 240°C
2. sustavi s dominantnim udjelom vruće vode i temperaturom do 350°C
3. napredni geotermalni sustavi (engl. EGS – enhanced geothermal systems) s temperaturama do 650°C

Sustavi pod brojevima 1 i 2 su povezani sa konvekcijskim hidrotermalnim sustavima koji se komercijalno iskorištavaju u svijetu, dok se sustav pod brojem 3 odnosi na eksploataciju topline iz vrućih suhih stijena te spada u napredne sustave (engl. EGS – enhanced geothermal systems).

Tri tipa tehnologija koje se uspješno komercijalno koriste u svijetu na geotermalnim elektranama su:

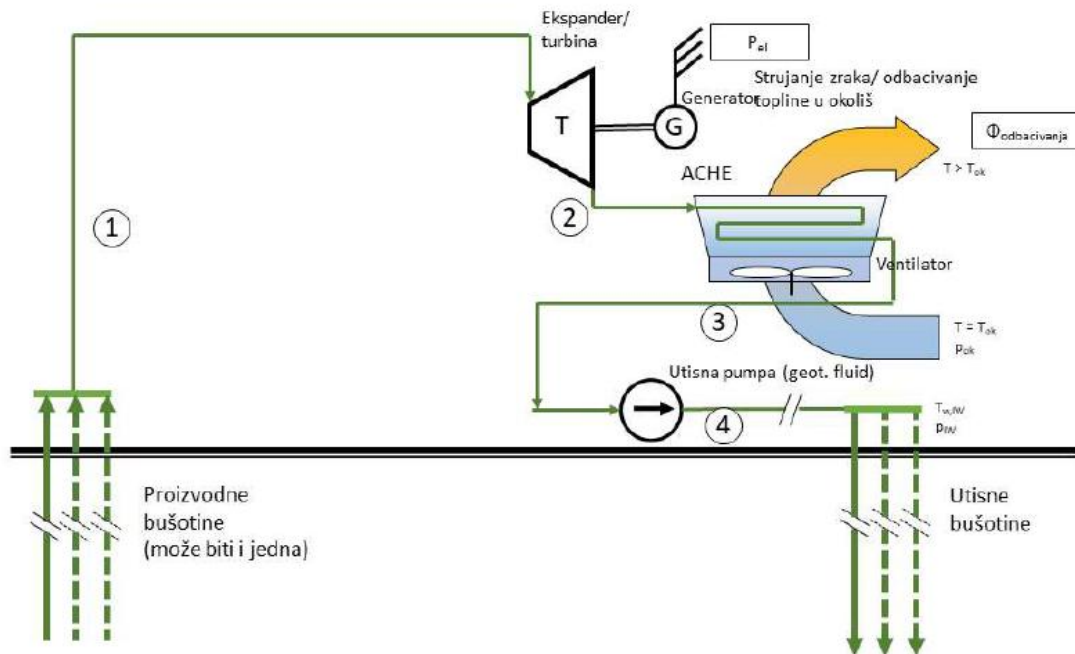
- proces suhe pare
- proces s isparavanjem (jednostrukim, dvostrukim ili trostrukim)
- binarni ili organski Rankine-ov proces (ORC)

2.1. Proces suhe pare

Postoje rijetka mjesta na svijetu, poput *The Geysers* u Kaliforniji, zatim *Larderello* u Italiji itd., gdje je posebno velik temperaturni gradijent stijena koji rezultira temperaturama u ležištu većim od 240°C.

Para koja se proizvodi iz ležišta transportira se do parne turbine koja pritom transformira termalnu energiju u mehaničku energiju, koja se zatim prenosi preko vratila na generator

gdje se proizvodi električna energija i zatim distribuira u mrežu. Para iz turbine odlazi u kondenzator gdje se kondenzira i potom utiskuje u ležište. Shema postrojenja nalazi se na grafičkom prilogu 2-1. Ova tehnologija zbog najjednostavnije izvedbe je i najjeftinija (Gupta et al., 2007.).



Grafički prilog 2-1. Shema procesa sa suhom parom (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

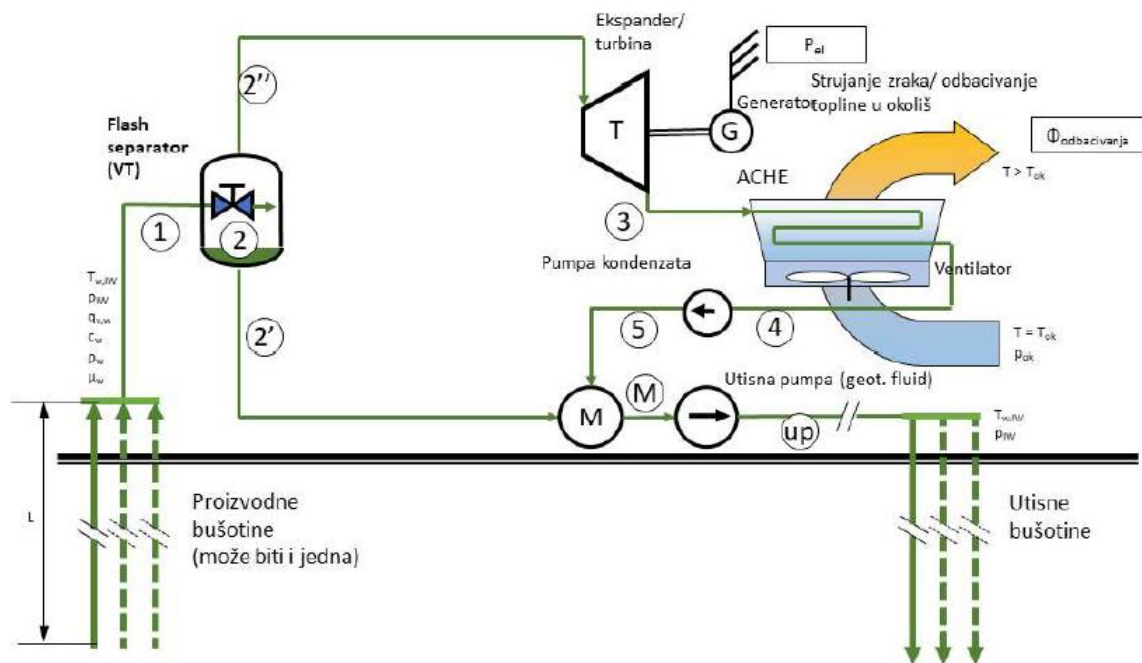
Ova tehnologija trenutno se odnosi na 22% ukupno instaliranog kapaciteta u svijetu, sa 63 instalirane geotermalne elektrane koje se većinom nalaze u SAD-u, Italiji, Indoneziji i Japanu (Bertani, 2016).

Što se tiče kemijskog sastava pare, ona se uobičajno sastoji od vode (više od 90%) i netopljivih plinova (engl. NCG – non condensable gases) sa udjelom manjim od 10% (Santoyo et al., 1991.). Ukoliko para sadrži netopljive plinove, nužno je da se ugradi postrojenje za izdvajanje plinova. Takvo postrojenje sadrži vakumske pumpe ili parne ejektore koji su dizajnirani da uklanjaju plinove poput CO_2 , H_2S , NH_3 , CH_4 i neke plinove u tragovima (He, Ar, N_2 , H_2 , CO). Prisutnost netopljivih plinova smanjuje učinkovitost turbine, a za to su zaslužna dva faktora koja smanjuju ukupnu količinu proizvedene električne energije. Prvi se odnosi na netopljive plinove koji se mogu nakupiti u kondenzatoru i time smanjiti njegovu učinkovitost, a drugi se odnosi na sadržaj H_2S -a u pari koji pretvara paru u korozivni agent koji postepeno nagriza i uništava dijelove turbine.

2.2. Proces sa isparavanjem (jednostrukim, dvostrukim ili trostrukim)

Kada je geotermalni fluid mješavina vruće vode i pare, tada se za proizvodnju električne energije koristi proces sa isparavanjem. Proces separacije može imati jednu, dvije ili tri faze, pa se stoga čitav proces zove jednostruko, dvostruko odnosno trostruko isparavanje, a broj faza određuju termodinamička svojstva geotermalnog fluida (Pall, 2011.).

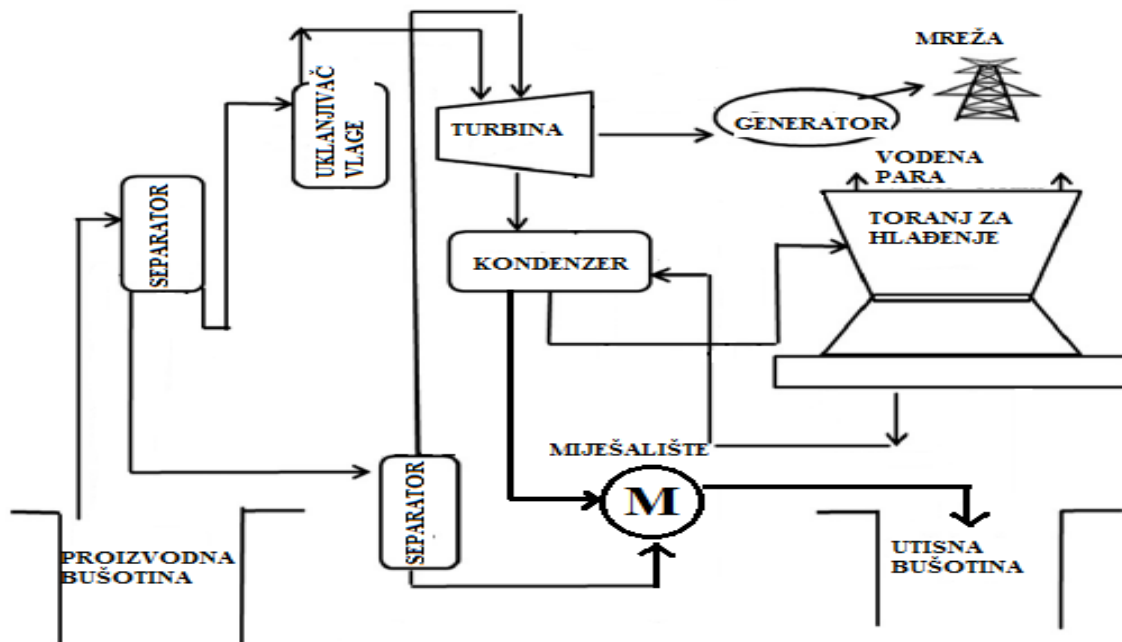
Kada je temperatura geotermalnog fluida veća od 210°C obično se koristi postrojenje s jednostrukim isparavanjem. U tom slučaju geotermalni fluid proizveden iz bušotine se šalje na ciklonski separator (Webre tipa) gdje se tekuća faza odvaja od pare na osnovu razlike u gustoćama (Pall, 2011.). Para zatim iz separatora odlazi na ekspanziju u turbinu, a preostala vruća voda iz separatora odlazi prema mješalištu gdje se miješa sa kondenziranim parom iz kondenzatora te se nakon toga utiskuju u utisnu bušotinu (Grafički prilog 2-2).



Grafički prilog 2-2. Shema procesa sa jednostrukim isparavanjem (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

U namjeri da se poveća učinkovitost procesa u proces se dodaje drugi separator pa se proces naziva dvostruko isparavanje (Grafički prilog 2-3). Taj proces se koristi kako bi izdvojio paru niskog tlaka koja nastaje iz vruće vode koja izlazi iz prvog separatora. Sekundarna para niskog tlaka odvodi se na turbinu niskog tlaka ili na odgovarajuću fazu na

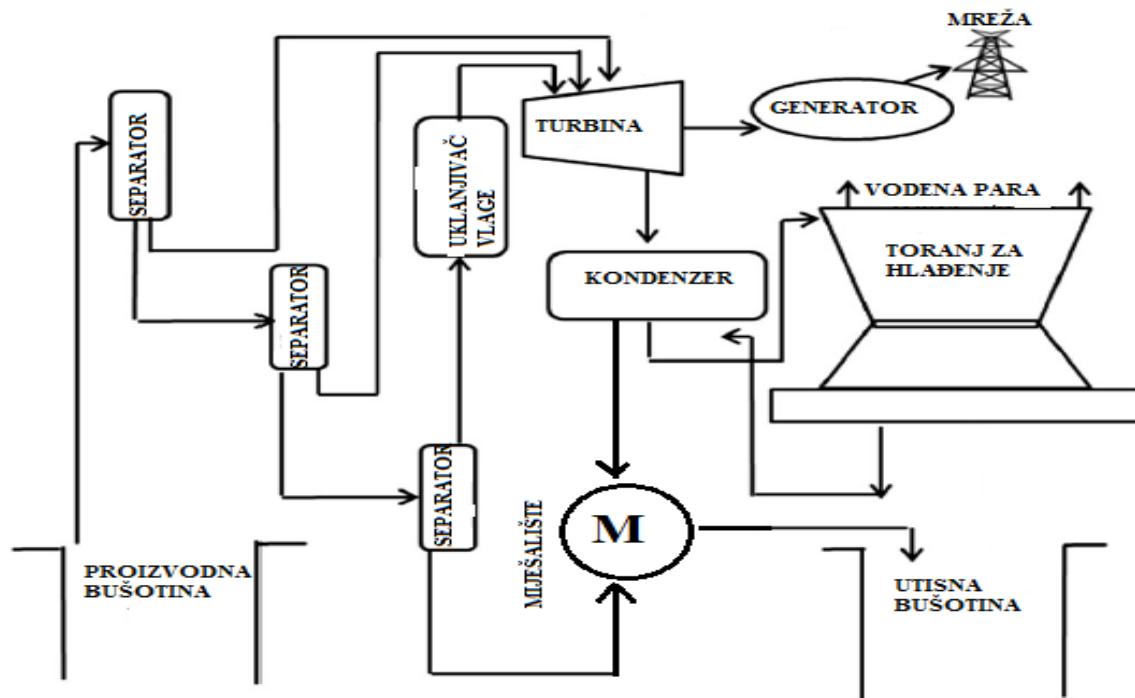
glavnoj turbini. Proces s dvostrukim isparavanjem uobičajno povećava učinkovitost procesa za 35% i količinu proizvedene električne energije za 20% u odnosu na proces s jednostrukim isparavanjem (Pall, 2011.).



Grafički prilog 2-3. Proces s dvostrukim isparavanjem (Richardson et al., 2015.)

U procesu s trostrukim isparavanjem dodaje se u izvedbu postrojenja još jedan separator (Grafički prilog 2-4). Taj proces je dizajniran da koristi energiju dostupnu u vrućoj vodi koja izlazi iz drugog separatora, ali i da smanji udio netopljivih plinova. Ova tehnologija se trenutno koristi na nekim geotermalnim poljima u SAD-u, Novom Zelandu i Turskoj.

Korištenje tehnologija s jednostrukim i dvostrukim isparavanjem odnosi se na 63% ukupne instalirane snage geotermalnih elektrana u svijetu, dok se još dodatnih 2% odnosi na tehnologiju trostrukog isparavanja.



Grafički prilog 2-4. Proces s trostrukim isparavanjem (Richardson et al., 2015.)

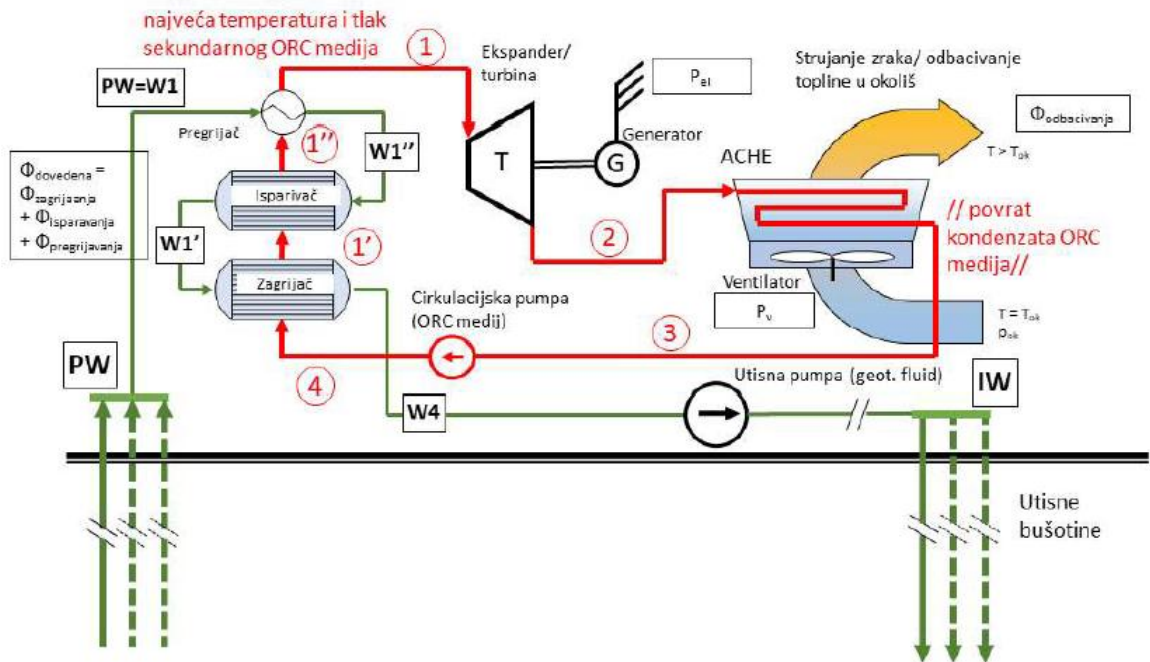
2.3. Binarni proces

U ležištima gdje je dominantna tekuća faza (vruća voda) sa temperaturama manjim od 200°C, za generaciju električne energije se koriste binarni procesi, koji prema autoru Bertaniju (2016.) predstavljaju 12% ukupnog instaliranog kapaciteta geotermalnih elektrana.

U ovom procesu geotermalni fluid ne može biti direktno korišten kao u prije opisanim procesima. Razlog tome je niska temperatura geotermalnog fluida, što dovodi do slabog isparavanja, odnosno male količine pare. No termalna energija u fluidu iskorištava se za isparavanje radnog fluida (koji ima nižu točku isparavanja). Radni fluid je obično organska kapljevina poput n-isobutana, n-isopentana ili pentana, a za proizvodnju električne energije koristi se organski Rankinov ciklus (ORC) ili Kalina ciklus (Pall, 2011.).

Proces prijelaza topline sa geotermalnog fluida na radni fluid događa se izmjenom topline redosljedom od pregrijača, isparivača sve do zagrijača, kako bi se kroz više koraka izmjene topline predalo više energije sekundarnom radnom fluidu koji odlazi prema

turbini (Slika 2-1) koju pokreće. Ekspandirana para kondenzira se u kondenzeru i kao kapljevina dolazi do cirkulacijske pumpe sekundarnog medija koja joj podiže tlak i šalje do zagrijača (prvog izmjenivača). Time je termodinamički ciklus zatvoren (Grafički prilog 2-5).



Grafički prilog 2-5. Shema binarnog procesa (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)



Slika 2-1. Parna turbina sekundarnog fluida (Flickr, 2019.)

2.4. Napredni geotermalni sustavi (EGS)

Napredni geotermalni sustavi su po principu vrlo slični binarnim sustavima za proizvodnju električne energije. Napredni geotermalni sustavi su dizajnirani s ciljem da se omogući eksploatacija širom dostupnih dubokih ležišta. Postoje tri tipa ležišta na kojima je moguće instalirati navedene sustave, a to su:

- vruće suhe stijene (engl. HDR – hot dry rock)
- vruće mokre stijene (engl. HWR – hot wet rock)
- vruće frakturirane stijene (engl. HFR – hot fractured rock)

Kako bi se takvi sustavi mogli eksploatirati, nužno je poboljšati propusnost stijena u ležištu na način da se prošire postojeće frakture ili da se stvore nove frakture u stijeni. Termalna energija se eksploatira tako da se kroz utisnu bušotinu utiskuje u ležište voda, ili neki drugi odgovarajući fluid poput CO₂, te pritom dolazi do prijelaza topline iz okolnih stijena na fluid koji je utisnut u ležište. Zagrijani fluid dolazi na površinu kroz proizvodnu bušotinu gdje je obično instalirano postrojenje sa binarnim procesom. Ponekad u ležišnim stijenama postoji fluid koji prirodno cirkulira (Breede et al., 2013.).

Unatoč velikom potencijalu za proizvodnju električne energije EGS sustava, implementacija ovih sustava nije još doživjela široku tržišnu uspješnost. Razlog tome je vjerojatno što je ta tehnologija tek u začecima, no u budućnosti bi mogla doživjeti širu primjenu. Trenutno postoje određeni pilot projekti vezani za EGS tehnologiju u Australiji, SAD-u, Italiji, Francuskoj, Njemačkoj, Švicarskoj i Japanu gdje su ležišta na dubinama između 3 i 10 km (Breede et al., 2013.).

3. FAKTORI KOJI UTJEČU NA UČINKOVITOST GEOTERMALNIH ELEKTRANA

Geotermalni fluid na svom putu od ležišta do postrojenja na površini prolazi kroz mnogobrojne dijelove opreme. Tijekom toga puta geotermalni fluid gubi energiju. Kada geotermalni fluid ulazi u proizvodnu bušotinu sadrži jednaku entalpiju kao i u ležištu. Zatim pri protoku kroz tubing, fluid gubi energiju (gubitak energije se očituje u padu entalpije fluida uslijed pada tlaka stupca vode i pada tlaka uslijed trenja). Energija se troši na savladavanje gravitacije, zatim otpora uz stijenku cijevi. Također, energija se troši za akceleraciju kod isparavanja i gubitak topline na okolne stijene koje su načelno hladnije od samog fluida. U prosjeku geotermalni fluid izgubi od 50 – 100 kJ/kg entalpije pri većini bušotina.

U sustavima s dominantnim udjelom kapljevine, proizvedeni dvofazni geotermalni fluid gubi značajnu količinu energije pri separaciji/otparavanju. Samo se para koja izlazi iz separatora koristi za generaciju električne energije, osim kod binarnih postrojenja. Kao primjer navodi se postrojenje s jednostrukim isparavanjem Kizildere, Turska, (Simsek et al., 2005.) koje koristi geotermalni fluid entalpije 875kJ/kg. Samo 36% topline iz separatora se šalje na turbinu, dok se 64% ponovo utiskuje u ležište. No u ležištima s većom entalpijom geotermalnog fluida situacija je puno povoljnija. Primjer za to je postrojenje s jednostrukim isparavanjem Nesjavellir, Turska, (Simsek et al., 2005.) gdje je entalpija geotermalnog fluida 1503 kJ/kg te 66% topline odlazi iz separatora prema turbini, dok se samo 34% ponovo utiskuje u ležište. Postrojenja s dvostrukim isparavanjem te binarna postrojenja koriste toplinu učinkovitije nego postrojenje s jednostrukim isparavanjem.

Prilikom dizajniranja separatora kod procesa s isparavanjem, glavna stvar koju treba uzeti u obzir je sadržaj silicijevog dioksida (SiO_2) u geotermalnom fluidu. Tijekom procesa isparavanja geotermalni fluid prolazi kroz ventil u separatoru pri čemu mu značajno pada tlak, radi povećanja udjela pare. U preostaloj kapljevini se nakon toga povećava koncentracija silicijevog dioksida koji može izgraditi debeli čvrsti sloj na unutarnjim stijenkama separatora i cjevovoda, ali i ostalim djelovima postrojenja kao i na lopaticama turbine otežavajući time protok pare kroz turbinu te posljedično smanjuje učinkovitost

postrojenja i povećava troškove održavanja. Ostali faktori koji utječu na učinkovitost postrojenja bit će navedeni ispod.

3.1. Udio netopljivih plinova

Naspram čiste pare iz parnih kotlova u konvencionalnim geotermalnim postrojenjima, geotermalna para sadrži netopljive plinove (NCG – engl. non-condensable gases) u rasponu od 0 pa sve do 15% u masenom udjelu na nekim geotermalnim poljima. Ti plinovi smanjuju kvalitetu geotermalne pare, povećavaju koroziju na postrojenju te zahtijevaju potrošnju električne energije kako bi se spomenuti netopljivi plinovi uklonili iz kondenzera. U ležištima gdje postoje netopljivi plinovi nužno je u sastav postrojenja dodati sustav za ekstrakciju plinova, koji značajno utječe na ukupne kapitalne troškove postrojenja i troše velike količine električne energije. Zbog toga je vrlo važno odabrati najbolje odgovarajući sustav za izdvajanje plinova kako bi se kapitalni i operativni troškovi sveli na minimum.

Netopljivi plinovi sastoje se najčešće od dušikovog dioksida (CO_2), sumporovodika (H_2S) i ostalih plinova u tragovima poput metana (CH_4), vodika (H_2), dušika (N_2), helija (He), argona (Ar) itd. Efekt netopljivih plinova nije toliko značajan sve dok para ne dođe do kondenzera. Geotermalni fluid koji sadrži netopljive plinove smanjuje učinkovitost konverzije geotermalne elektrane na način da se smanjuje specifični rad pri ekspanziji u turbini. (Vorum i Fitzler, 2000.)

Na geotermalnoj elektrani Kizildere, Turska, prosječni maseni udio netopljivih plinova u fluidu je 13%, što znači da je potrošnja električne energije na samom postrojenju relativno visoka u odnosu na druge geotermalne elektrane, poradi sustava za izdvajanje plinova. Para koja sadrži 1% netopljivih plinova smanjuje neto proizvedenu električnu energiju za 0,59% u usporedbi sa geotermalnim elektranama koje koriste fluid bez sadržaja netopljivih plinova (Hudson, 1988.).

$$\eta_{\text{NCG}} = 1 - 0,0059C \quad (3-1)$$

U jednadžbi 3-1 η_{NCG} predstavlja postotak neto proizvedene električne energije dok C predstavlja maseni udio netopljivih plinova u geotermalnom fluidu.

3.2. Parazitsko opterećenje

Hlađenje pare kada izlazi iz turbine je nužno kako bi se povećala učinkovitost konverzije elektrane. Hlađenjem pare postiže se niži tlak u kondenzeru što osigurava veći specifični rad pri ekspanziji u turbini i na taj način i veću količinu proizvedene električne energije. No hlađenje vode zahtijeva dodatnu opremu poput pumpa i ventilatora, koji troše električnu energiju. Rashladni toranj suhog tipa troši dva puta više električne energije od rashladnog tornja mokrog tipa i zauzima dva puta više prostora (Mendrinós et al., 2006.).

Dodatna potrošnja električne energije, koja uključuje sve pumpe, rashladnu opremu i sustav za izdvajanje netopljivih plinova je označena u jednadžbi 3-2 kao W_{apc} . Potrebno je pravilno dimenzionirati svu opremu na postrojenju kako bi W_{apc} bila što niža. U jednadžbi 3-2 η_{apc} označava udio parazitskog opterećenja u ukupno proizvedenoj električnoj energiji na postrojenju, dok W_{gross} označava bruto odnosno ukupno proizvedenu električnu energiju.

$$\eta_{apc} = -1 \frac{W_{apc}}{W_{gross}} \quad (3-2)$$

W_{apc} je vrlo ovisna o tipu geotermalne elektrane. Generalno W_{apc} je veća kod binarnih postrojenja zbog složenije izvedbe tj. više instalirane opreme. Povećanjem veličine elektrane povećava se W_{gross} , a time se i smanjuje η_{apc} .

3.3. Gubitak topline

Geotermalni fluid gubi toplinu kako teče kroz cijevi, ventile, separatore i ostale dijelove opreme. Gubitak topline ovisi o veličini cjevovoda, vrsti izolacije koja je postavljena na cjevovode i opremu, duljini cjevovoda te o okolišnoj odnosno vanjskoj temperaturi. Gubitkom topline dolazi do blage kondenzacije pare. Kondenzat se skuplja na najnižim mjestima u cjevovodu te se ispušta kroz drenažne otvore, što smanjuje ukupnu količinu pare koja dolazi do turbine. Ipak zbog vrlo malog gubitka topline u cjevovodima, moguće ga je zanemariti. No svakako, čim kraći cjevovodi rezultiraju manjim gubitkom topline.

Npr. para s masenim protokom od 80 t/h i temperaturom od 180°C putuje cjevovodom promjera 0,4 m i duljine 2 km. Cijev je izolirana 8 cm debelim slojem fiberglasa i vanjska temperatura je 20°C. U tom slučaju, ulazna entalpija je 2777,1 kJ/kg, dok je izlazna

entalpija 2759,4 kJ/kg, što rezultira gubitkom topline od 0,6% (Zarrouk, 2011.). Na ovom primjeru može se formirati slijedeća jednadžba,

$$\eta_{\text{pipe}} = 1 - 0,003L_p \quad (3-3)$$

gdje η_{pipe} predstavlja učinkovitost cijevi vezana za očuvanje topline, dok L_p predstavlja duljinu cjevovoda u km.

3.4. Učinkovitost turbine

Prema autoru Wahlu (1977.), učinkovitost geotermalnih parnih turbina varira između 60 i 80%. No autori Dickson i Fanelli (2003.) navode da je izentropska efikasnost geotermalne turbine uobičajno između 81 i 85%.

Efikasnost turbine pada radi devijacije od izentropskog ponašanja i prisutnosti vlage u turbini tijekom procesa ekspanzije. Baumannovo pravilo kazuje kako prisutnost od 1% vlage u pari uzrokuje pad učinkovitosti turbine od otprilike 1%. Baumannovo pravilo napisano je u jednadžbi 3-4.

$$\eta_t = \eta_{td} * \left(a * \frac{X_{in} + X_{out}}{2} \right) \quad (3-4)$$

gdje je η_t učinkovitost turbine, η_{td} učinkovitost turbine u slučaju kada u fluidu nema vlage i iznosi oko 0.85 (DiPipp i Energy, 1978.), X_{in} je frakcija suhe pare na ulazu u turbinu (jednaka 1), dok je X_{out} frakcija suhe pare koja izlazi iz turbine. Koeficijent „a“ je empirijska vrijednost poznata pod nazivom Baumannov faktor, koji može biti različitih vrijednosti između 0,4 i 2, ovisno o vrsti turbine, no uobičajno se pretpostavlja da je jednak 1.

3.5. Učinkovitost generatora

Učinkovitost generatora povezana je sa njegovom snagom. Tablica 3-1 daje pregled nekoliko generatora različitih snaga i proizvođača, gdje se jasno vidi kako učinkovitost generatora raste sa veličinom odnosno snagom generatora. Što s tiče geotermalnih postrojenja, učinkovitost instaliranih generatora varira između 95,7 do 98,7% (Lund et al, 2010.).

| Proizvođač | Model | Snaga (MW) | Učinkovitost (%) |
|-------------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Mitsubishi | S16R-PTAA2 | 2,2 | 95,7 |
| Siemens | SGen5-100A-4P | 25-70 | 98,5 |
| Siemens | SGen5-100A-2p | 25-300 | 98,7 |
| GE | W28 | 550 | 99 |

Tablica 3-1. Prikaz učinkovitosti različitih generatora (Zarrouk i Moon, 2014.)

Uzimajući u obzir sve spomenute faktore koji utječu na učinkovitost geotermalnih elektrana, može se izvesti jednadžba koja opisuje ukupnu učinkovitost geotermalnog postrojenja.

$$\eta = q_m * \Delta h * \eta_g * \eta_t * \eta_{apc} * \eta_{ncg} * \eta_{pipe} \quad (3-5)$$

U jednadžbi 3-5 η predstavlja ukupnu učinkovitost geotermalne elektrane, Δh predstavlja razliku ulazne i izlazne entalpije na turbini, dok su ostali članovi jednadžbe opisani u prijašnjim poglavljima.

4. MATEMATIČKI MODEL ZA TRI OSNOVNA TIPRA GEOTERMALNIH ELEKTRANA

Kako bi se pravilno dimenzioniralo geotermalno postrojenje, potrebno je provesti termodinamički proračun. U ovom poglavlju bit će isključivo navedene formule prema kojima je proračun napravljen. Za izračun učinkovitosti konverzije geotermalnih elektrana ($\eta_{kon,el}$) bitno je izračunati proizvedenu toplinsku energiju iz ležišta. Proizvedena toplinska energija iz ležišta računa se prema jednadžbi 4-1, u kojoj P_{th} označava termalnu energiju proizvedenu iz ležišta, q_m maseni protok geotermalnog fluida, a h_{pw} entalpiju geotermalnog fluida na proizvodnoj bušotini.

$$P_{th} = q_m * h_{pw} \quad (4-1)$$

4.1. Matematički model procesa suhe pare

Proračun se izvodi na temelju grafičkog priloga 2-1, u kojemu su brojevima od 1 do 4 označena termodinamička stanja bitna za proračun.

Stanje 1

- $T_1 = T_{pw}$
- $p_1 = p_{pw}$

Iz zadanih početnih uvjeta na ušću proizvodne bušotine (T_{pw} , p_{pw}) može se očitati entalpija u stanju 1 (h_1)

- $h_1 = h_{pw}$

Za stanje 1 bitan ulazni podatak je maseni protok (q_m), koji je zadan kao takav ili u slučaju da je zadan kao volumni protok (q_v) proračunava se prema jednadžbi 4-2. ρ_1 predstavlja gustoću geotermalnog fluida.

$$q_m = q_v * \rho_1 \quad (4-2)$$

Stanje 2

Ekspanzija će završiti u dvofaznom području i to na tlaku kondenzacije koji odgovara temperaturi kondenzacije. Temperatura kondenzacije (T_k) je zadana je okolišnom

temperaturom (T_o) i pinch temperaturom (ΔT_{pinch}), koja se definira kao razlika između okolišne temperature i temperature kondenzacije, dok se tlak kondenzacije (p_k) i entalpija u stanju 2 (h_2) te sadržaj pare (x_2) očitaju iz dvofaznog dijagrama.

- $T_2 = T_k$
- $p_2 = p_k$
- h_2
- x_2

Stanje 3

Stanje 3 je stanje potpune kondenzacije (mokra para, $x = 0$), gdje tlak i temperatura ostaju jednaki kao i u stanju 2. Entalpiju u stanju 3 (h_3) očitamo iz dijagrama.

- $T_3 = T_k = T_o + (\Delta T_{\text{pinch}})$
- $p_3 = p_k$
- h_3

Stanje 4

Stanje 4 je na tlaku utisne bušotine (p_{IW}) koji je zadan u ulaznim podacima. Specifični tehnički rad utisne pumpe (w_p) (kondenziranog H_2O) nam je bitan kako bismo izračunali h_4 .

$$w_p = v_3 * (p_{IW} - p_3) * 10^5 \quad (4-3)$$

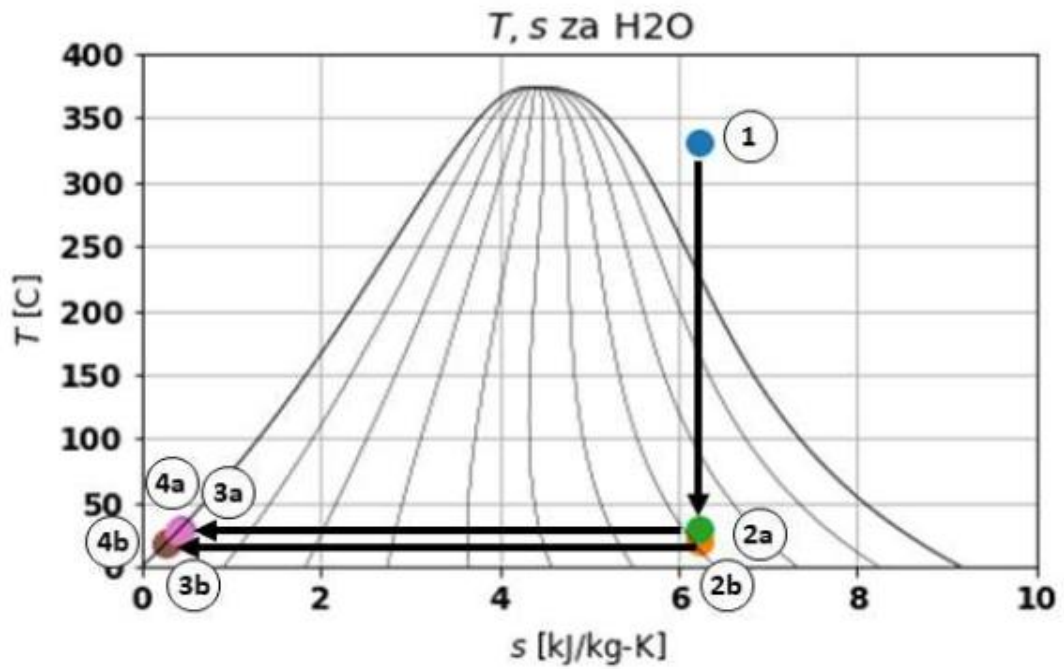
U jednadžbi 4-3 v_3 predstavlja specifični volumen koji odgovara gustoći od 1000 kg/m^3 (pretpostavljena gustoća kondenziranog fluida) i za pretpostavljenu gustoću iznosi $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$.

$$h_4 = h_3 + w_p \quad (4-4)$$

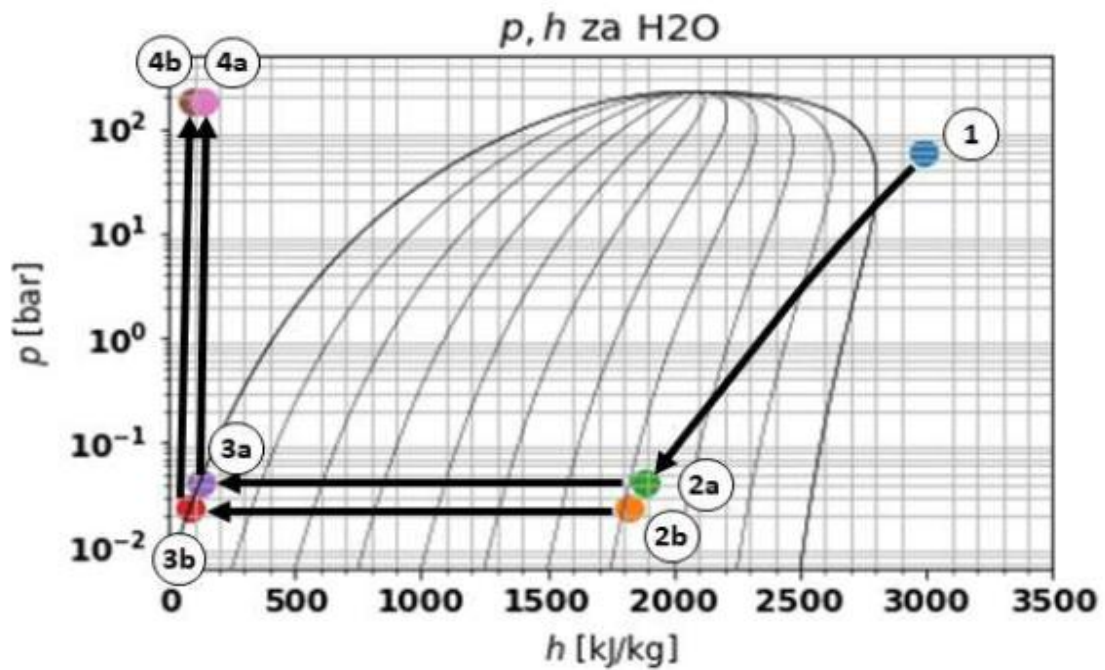
- $p_4 = p_{iw}$
- h_4

Dobivena termodinamička stanja i procesi mogu se skicirati u T-s i p-h dijagramima, što je prikazano u grafičkim priložima 4-1 i 4-2. Brojevima od 1 do 4 su označena karakteristična termodinamička stanja koja su prethodno opisana. Na dijagramima postoje dva slučaja, a i b, koji predstavljaju različite pinch temperature. Pinch temperatura u slučaju b je manja od

slučaja a, čime se postiže veći rad turbine pri ekspanziji, odnosno veća proizvodnja energije. Vrijednosti na dijagramima su informativnog karaktera.



Grafički prilog 4-1. T-s dijagram radnog procesa za H₂O pri procesu suhe pare (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)



Grafički prilog 4-2. p-h dijagram radnog procesa za H₂O pri procesu suhe pare (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

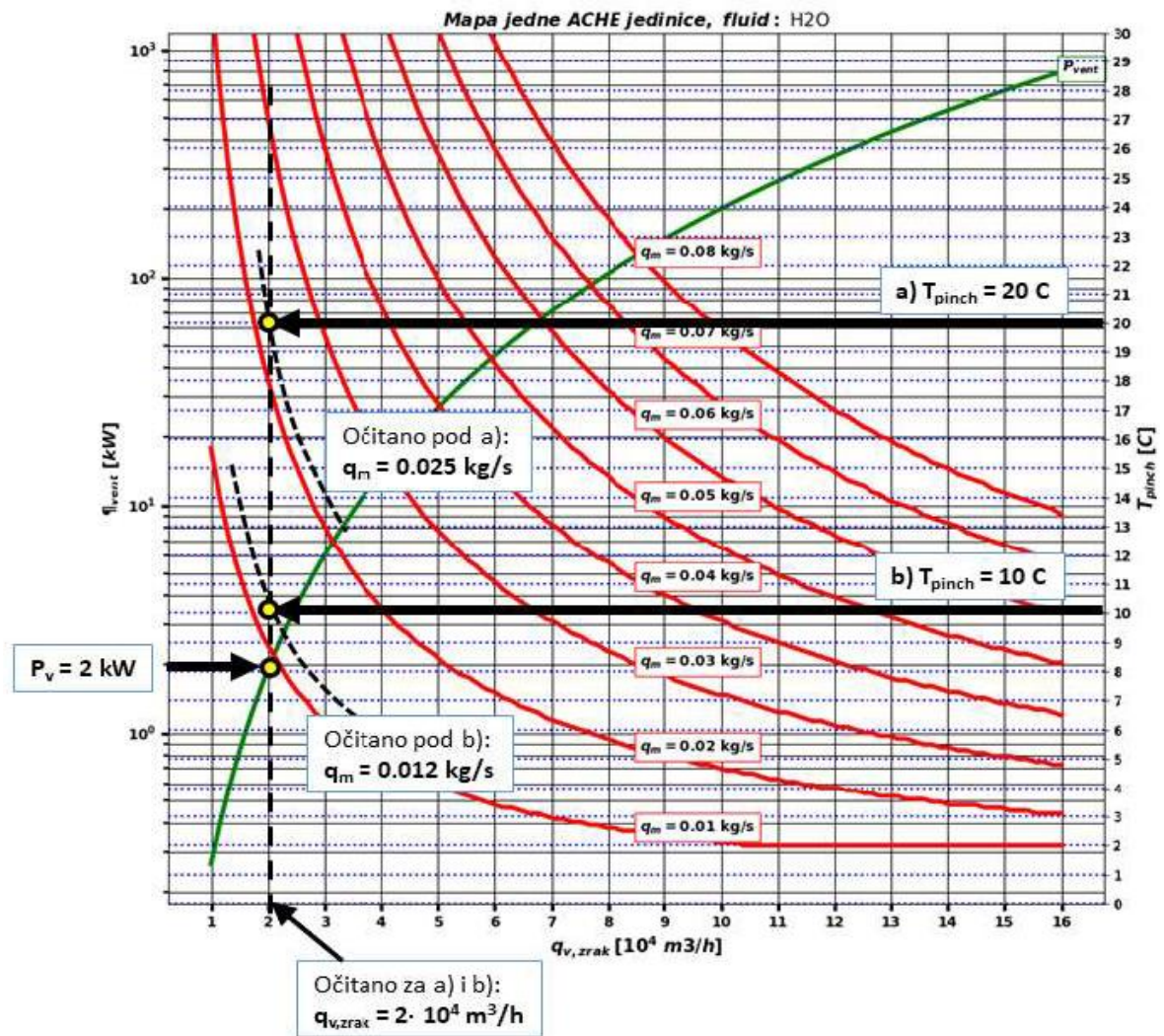
Iz gore navedenih podataka može se izračunati snaga na pragu elektrane (P_{el}). U jednadžbi 4-5 P_T označava snagu turbine, P_p snagu utisne pumpe i P_{ACHE} snagu ACHE jedinica (ventilatora za rashlađivanje geotermalnog fluida pri kondenzaciji). η_g (učinkovitost generatora) i η_t (učinkovitost turbine) dodani su jednadžbi 4-6 kako bi se dobio približno točan rezultat neto proizvedene električne energije. Pretpostavljena vrijednost η_g je 96%, dok za η_t pretpostavljena vrijednost je 82%.

$$P_{el} = P_T - P_p - P_{ACHE} \quad (4-5)$$

$$P_T = (q_m * (h_1 - h_2)) * \eta_g * \eta_t \quad (4-6)$$

$$P_p = q_m * w_p \quad (4-7)$$

P_{ACHE} se određuje prema radnoj krivulji ACHE jedinice za radni fluid, u ovom slučaju H_2O .



Grafički prilog 4-3. ACHE mapa za H₂O (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

Riješenje za potrošnju ACHE jedinica očitava se iz grafičkog priloga 4-3. na način kako je naznačeno strelicama na grafičkom prilogu. Zadana je snaga jedne ACHE jedinice (P_v), zatim pinch temperature (a i b slučaj), a maseni protoci kroz jednu ACHE jedinicu ($q_{m,ACHE}$) se procijene. Ukupni broj ACHE jedinica ($N_{v,r}$) se računa prema jednadžbi 4-8, gdje se rezultat zaokružuje na prvi veći cijeli broj. Zatim se vrijednost ukupnog broja ACHE jedinica korigira sa koeficijentom x_2 , koji označava udio pare u dvofaznom području, jer nakon procesa ekspanzije potrebno je kondenzirati samo dio fluida, odnosno paru (jednadžba 4-9).

$$N_{v,r} = (q_m / q_{m,ACHE}) \quad (4-8)$$

$$N_{v,korig.} = N_{v,r} * x_2 \quad (4-9)$$

Ukupna snaga ACHE jedinica računa se prema jednadžbi 4-10.

$$P_{ACHE} = N_{v,korig.} * P_v \quad (4-10)$$

4.2. Matematički model procesa s jednostrukim isparavanjem

Proračun se izvodi na temelju grafičkog priloga 2-2, u kojemu su brojevima i slovima označena termodinamička stanja bitna za proračun.

Stanje 1

- $p_1 = p_{pw}$
- x_1

Iz zadanih početnih uvjeta na ušću proizvodne bušotine (x_1, p_{pw}) može se očitati entalpija u stanju 1 (h_1)

- $h_1 = h_{pw}$
- $T_1 = T_{pw}$

Za stanje 1 bitan ulazni podatak je maseni protok (q_m), koji je zadan kao takav ili u slučaju da je zadan kao volumni protok (q_v) proračunava se prema jednadžbi 4-11. ρ_1 predstavlja gustoću geotermalnog fluida.

$$q_m = q_v * \rho_1 \quad (4-11)$$

Stanje 2

Stanje 2 događa se nakon ekspanzije u ventilu flash separatora (izentalpski proces), pri čemu entalpija ostaje jednaka prethodnom stanju, dok se usred pada tlaka (Δp_{FL}) povećava sadržaj pare.

- $h_2 = h_1$
- $p_2 = p_1 - \Delta p_{FL}$
- $x_2 > x_1$

U flash separatoru imamo razdvajanje masenih tokova na linije mokre pare ($x = 0$) – stanje 2' i linije zasićenja ($x = 1$) – stanje 2". Iz zakona o očuvanju mase (4-12) i zakona o očuvanju energije (4-13) izračunavaju se maseni protoci mokre pare (4-15) i suhozasićene pare (4-14) koje izlaze iz separatora.

$$q_m = q_{mL} + q_{mG} \quad (4-12)$$

$$q_m h_2 = q_{mL} h_{2'} + q_{mG} h_{2''} \quad (4-13)$$

$$q_{mG} = q_m * x_2 \quad (4-14)$$

$$q_{mL} = q_m * (1-x_2) \quad (4-15)$$

Specifičnu entalpiju u stanjima 2' i 2'' možemo očitati iz dijagrama.

- $h_{2'}$ – entalpija vruće vode
- $h_{2''}$ – entalpija pare

Stanje 3

U turbinu ulazi suhozasićena para ($x = 1$) na tlaku p_2 i s masenim protokom q_{mG} . Ekspanzija će završiti u dvofaznom području i to na tlaku kondenzacije koji odgovara temperaturi kondenzacije. Temperatura kondenzacije (T_k) je zadana je okolišnom temperaturom (T_o) i pinch temperaturom (ΔT_{pinch}), koja se definira kao razlika između okolišne temperature i temperature kondenzacije, dok se tlak kondenzacije (p_k) i entalpija u stanju 3 (h_3) te sadržaj pare (x_3) očitaju iz dvofaznog dijagrama.

- $T_3 = T_k = T_o + (\Delta T_{pinch})$
- $p_3 = p_k$
- h_3
- x_3

Stanje 4

Stanje 4 je stanje potpune kondenzacije (mokra para, $x = 0$), gdje tlak i temperatura ostaju jednaki kao i u stanju 3. Entalpiju u stanju 4 (h_4) očitamo iz dijagrama.

- $T_4 = T_k$
- $p_4 = p_k$
- h_4

Stanje 5

Ukapljena voda iz kondenzatora ulazi u pumpu kondenzata koja mora ostvariti tlak mješališta (p_M).

- $p_5 = p_M = p_2$

Specifični tehnički rad pumpe kondenzata opisan je jednadžbom 4-16, dok se entalpija u stanju 5 izračunava prema jednadžbi 4-17.

$$w_{p,kond} = v_4 * (p_5 - p_4) * 10^5 \quad (4-16)$$

$$h_5 = h_4 + w_{p,kond} \quad (4-17)$$

Stanje M

Stanje M je stanje mješališta. S obzirom da u mješalište ulaze dvije struje ukapljene H₂O, ali svaka s različitim temperaturama (T₂ i T₅) i masenim protocima (q_{mL} i q_{mG}), na izlazu iz mješališta će vladati tlak mješališta (p_m) pri ukupnom protoku i entalpiji koju moramo izračunati. Iz zakona o očuvanju mase (4-12) i energije (4-13) izračunava se entalpija u mješalištu (h_m) koja je opisana jednadžbom 4-18.

$$h_m = (q_{mG}h_5 + q_{mL}h_2)/q_m \quad (4-18)$$

Stanje 6

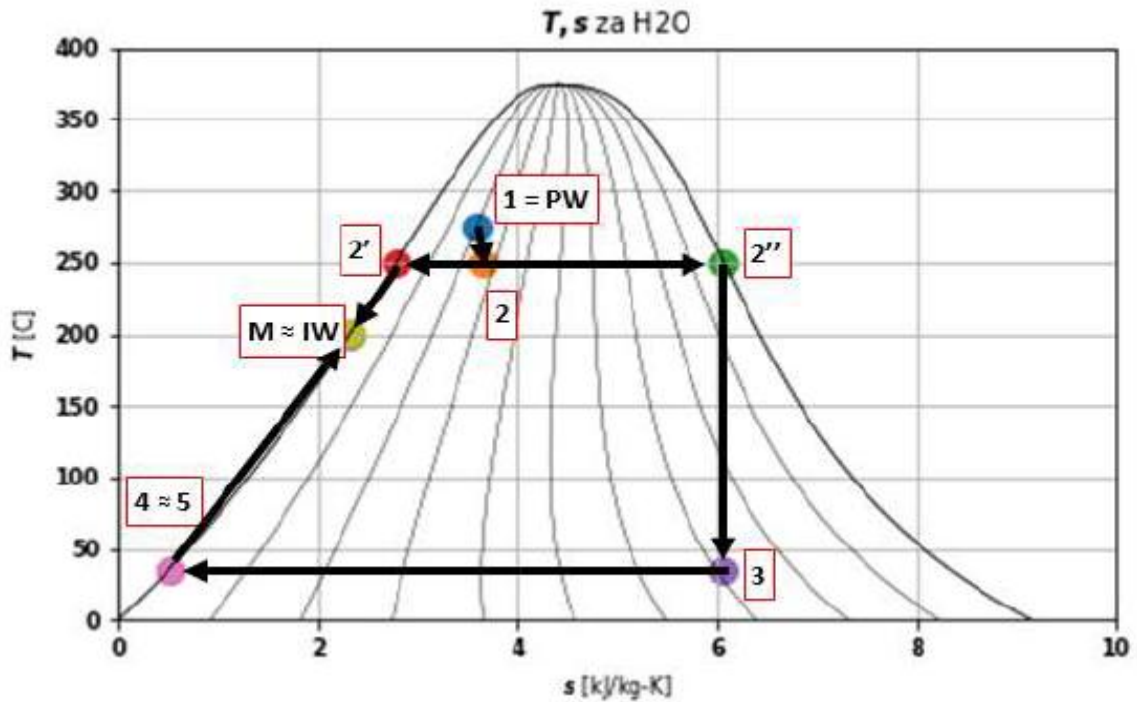
Stanje 6 je na tlaku utisne bušotine (p_{IW}) koji je zadan u ulaznim podacima. Utisna pumpa mora savladati razliku tlakova na izlazu iz mješališta p_M i ulaza u utisnu bušotinu p_{IW}. Specifični tehnički rad utisne pumpe (w_p) bitan je kako bi se izračunala entalpija h_{IW}.

$$w_p = v_M * (p_{IW} - p_M) * 10^5 \quad (4-19)$$

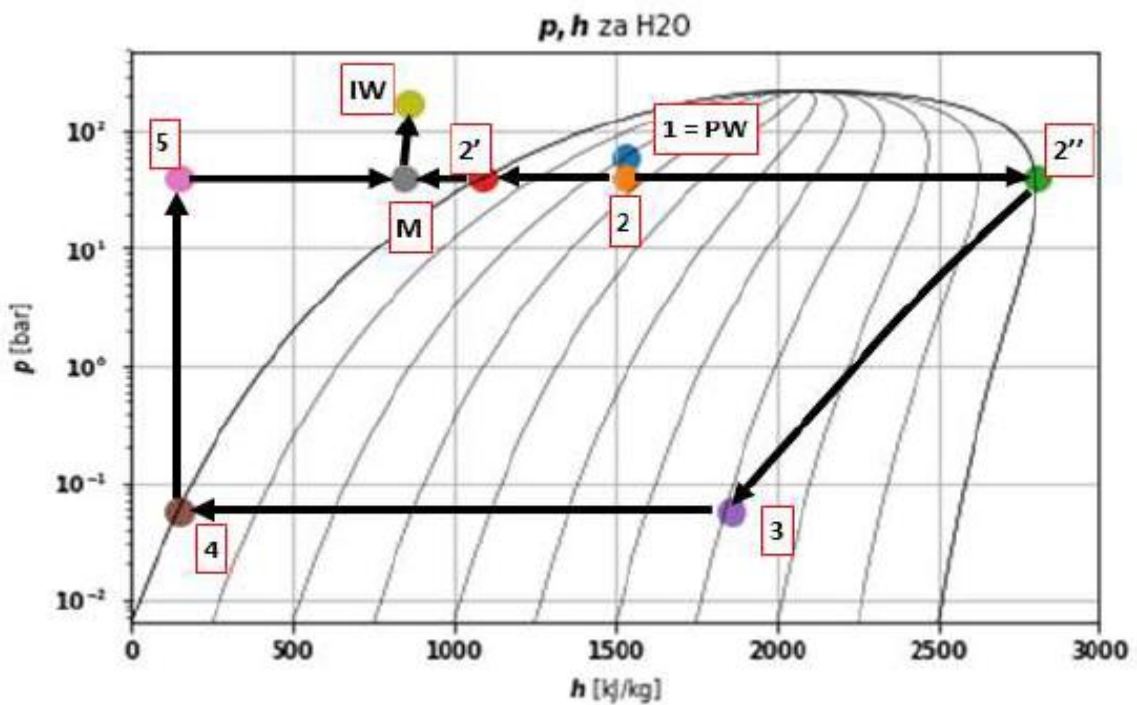
$$h_{IW} = h_M + w_p \quad (4-20)$$

$$- \quad p_6 = p_{iw}$$

Dobivena termodinamička stanja i procesi mogu se skicirati u T-s i p-h dijagramima, što je prikazano u grafičkim priložima 4-4 i 4-5. Brojevima i slovima su označena karakteristična termodinamička stanja koja su prethodno opisana. Vrijednosti na dijagramima su informativnog karaktera.



Grafički prilog 4-4. T-s dijagram radnog procesa za H₂O u procesu s jednostrukim isparavanjem (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)



Grafički prilog 4-5. p-h dijagram radnog procesa za H₂O u procesu s jednostrukim isparavanjem (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

Iz gore navedenih podataka može se izračunati snaga na pragu elektrane (P_{el}). U jednadžbi 4-21 P_T označava snagu turbine, $P_{p,kond}$ snagu pumpe kondenzata, P_p snagu utisne pumpe i P_{ACHE} snagu ACHE jedinica (ventilatora za rashlađivanje geotermalnog fluida pri kondenzaciji). η_g (učinkovitost generatora) i η_t (učinkovitost turbine) dodani su jednadžbi 4-22 kako bi se dobio približno točan rezultat neto proizvedene električne energije. Pretpostavljena vrijednost η_g je 96%, dok za η_t pretpostavljena vrijednost je 82%.

$$P_{el} = P_T - P_{p,kond} - P_p - P_{ACHE} \quad (4-21)$$

$$P_T = (q_{mG} * (h_{2'} - h_3)) * \eta_g * \eta_t \quad (4-22)$$

$$P_{p,kond} = q_{mG} * w_{p,kond} \quad (4-23)$$

$$P_p = q_m * w_p \quad (4-24)$$

P_{ACHE} se određuje prema radnoj krivulji ACHE jedinice za radni fluid, u ovom slučaju H_2O .

Potrošnja ventilatora određuje se iz zadane pinch temperature i masenog protoka kroz pojedini ventilator. Ovdje treba napomenuti da se u svakoj pojedinoj ACHE jedinici kondenzira dio ukupnog masenog protoka.

$$q_{m,ACHE,r} = q_{mG} / N_v \quad (4-25)$$

$$q_{m,ACHE,korig.} = q_{m,ACHE,r} * x_3 \quad (4-26)$$

Računski maseni protok ($q_{m,ACHE,r}$) mora se korigirati s obzirom na to da samo dio tog masenog protoka treba ukapljiti (jer je $x < 1$). Korekcija se obavlja množenjem sa sadržajem pare (jednadžba 4-26).

Nakon toga sa zadanim i proračunatim parametrima ($q_{m,ACHE,korig.}$, ΔT_{pinch}) se prema grafičkom prilogu 4-3 procjenjuje utrošak jedne ACHE jedinice (P_v), te se za ukupnu snagu ACHE jedinica (jednadžba 4-27) množi snaga pojedinog ventilatora (P_v) sa brojem ACHE jedinica koji je zadan (N_v).

$$P_{ACHE} = N_v * P_v \quad (4.27)$$

4.3. Matematički model binarnog procesa

Proračun se izvodi na temelju grafičkog priloga 2-5, u kojemu su brojevima i slovima označena termodinamička stanja bitna za proračun.

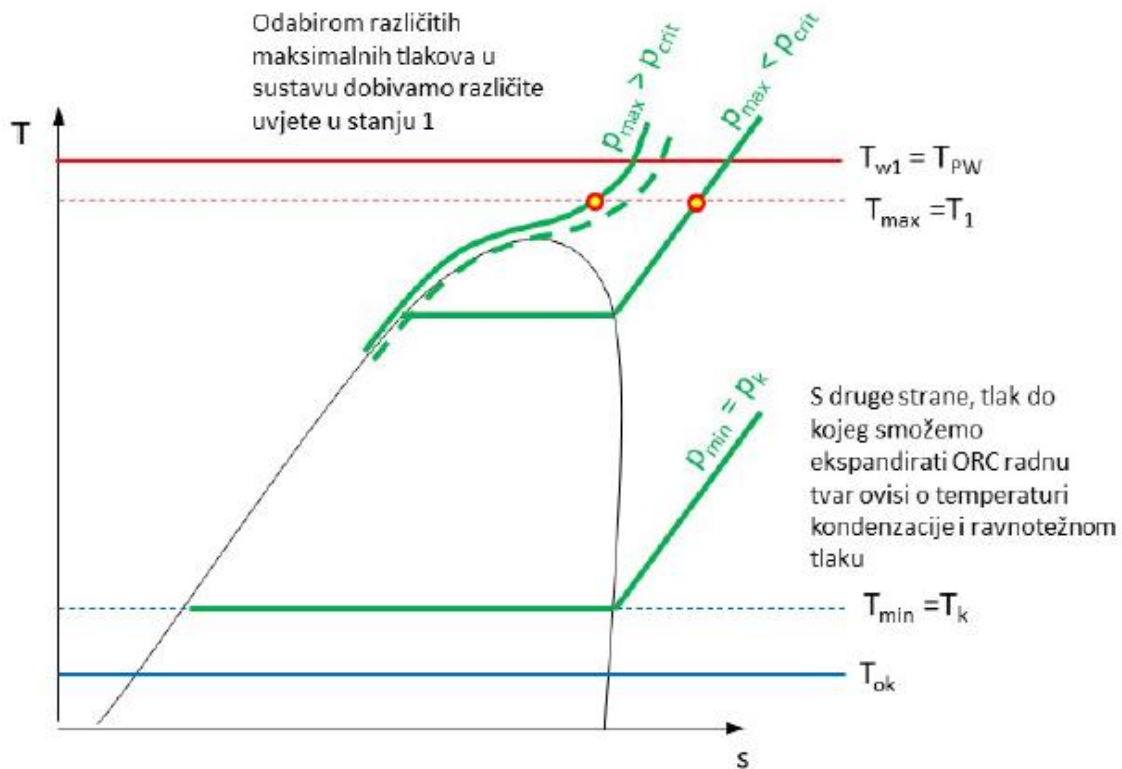
Geotermalni fluid se proizvodi sa stanjem proizvodne bušotine (T_{pw} , p_{pw}), te prolazi kroz glavni izmjenjivač gdje se postepeno hladi prolaskom kroz pregrijač, isparivač i zagrijač sekundarnog kruga ORC radnog medija. Tako ohlađen dolazi do utisne pumpe koja mora ostvariti tlak utiskivanja (p_{IW}). Sekundarni radni medij prolazi sve faze Rankine-ovog ciklusa, a s obzirom na to da radna tvar najčešće sadrži organske spojeve (obično izobutan ili pentan), takav proces se naziva organski Rankine-ov proces ili ORC. Glavna razlika je u upotrebi organske radne tvari koja ima manje topline i niže temperature isparavanja od H_2O u Rankine-ovom ciklusu.

Stanje 1

Stanje 1 je stanje na izlazu iz pregrijača. Prema kriteriju pinch temperature na glavnom izmjenjivaču ($\Delta T_{pinch,IZ}$) koja je definirana kao najmanja razlika između temperature geotermalnog fluida i temperature sekundarnog fluida na glavnom izmjenjivaču, u glavnom izmjenjivaču ne smije doći do temperaturne razlike manje od $\Delta T_{pinch,IZ}$ (obično $5^\circ C$). Cilj je da se ORC medij dovede do najviše temperature (jer se time povećava termodinamička iskoristivost procesa). Tako se može prema jednadžbi 4-28 odrediti maksimalna temperatura ORC medija koja je ujedno temperatura u stanju 1 (T_1).

$$T_{max} = T_{pw} - \Delta T_{pinch,IZ} \quad (4.28)$$

Tlak u stanju 1 nije unaprijed određen, a moguće je ga je procijeniti kvalitativnom analizom prema grafičkom prilogu 4.6.



Grafički prilog 4-6. Određivanje tlaka kvalitativnom analizom (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

U grafičkom prilogu 4-6 vidljivo je da je moguće odabrati dva tlaka; i to $p_{max} < p_{crit}$ i $p_{max} > p_{crit}$. Za stanje 1 odabran je tlak $p_{max} < p_{crit}$. Kad su poznati tlak i temperatura u stanju 1, moguće je iz p-h dijagrama radnog ORC fluida očitati entalpiju (h_1).

- h_1

Stanje 2

Ekspanzija u turbini je izentropska i odvija se do tlaka kondenzacije, ali ne i do temperature kondenzacije (jer je fluid „suhi“, što znači da ima negativan nagib krivulje $x = 1$). Termodinamičko stanje 2 se ne nalazi na najnižoj temperaturi (vidjeti skicu ciklusa na grafičkom prilogu 4-7), već ga treba očitati na presjecištu izentropije i tlaka kondenzacije. tlak kondenzacije je određen temperaturom kondenzacije (T_k), a koja je pak određena temperaturom okoliša i pinch temperaturom ACHE jedinice prema jednadžbi 4-29. Temperaturi kondenzacije odgovara tlaku kondenzacije koji se očitava iz dijagrama. Entalpija (h_2) očitava se iz dijagrama.

$$T_{min} = T_k = T_o + \Delta T_{pinch,ACHE} \quad (4-29)$$

- $p_k = p_{\min} = p_2$
- $T_2 > T_k$
- h_2

Stanje 3

Stanje 3 je stanje nakon hlađenja i kondenzacije do linije mokre pare ($x = 0$), dok je linija suhe pare ($x=1$) označena sa brojem 3'. ACHE jedinice prvo ohladi ORC radni medij s h_2 na h_3' (smanjenje osjetne entalpije, osjetna jer se osjeća kao pad temperature), a onda ga kondenzira od h_3' na h_3 (smanjenje latentne entalpije kod koje nema promjene temperature). Entalpije se očitavaju iz dijagrama.

- $T_3 = T_k$
- $p_3 = p_2 = p_k$
- h_3
- $T_{3'} = T_3$
- $p_{3'} = p_3 = p_k$
- $h_{3'}$

Stanje 4

Stanje 4 je na izlazu iz napojne pumpe ORC radnog fluida. Specifični rad pumpe ($w_{p,ORC}$) definiran je jednadžbom 4-30, dok se entalpija (h_4) izračunava prema jednadžbi 4-31.

$$w_{p,ORC} = v_3 * (p_4 - p_3) * 10^5 \quad (4.30)$$

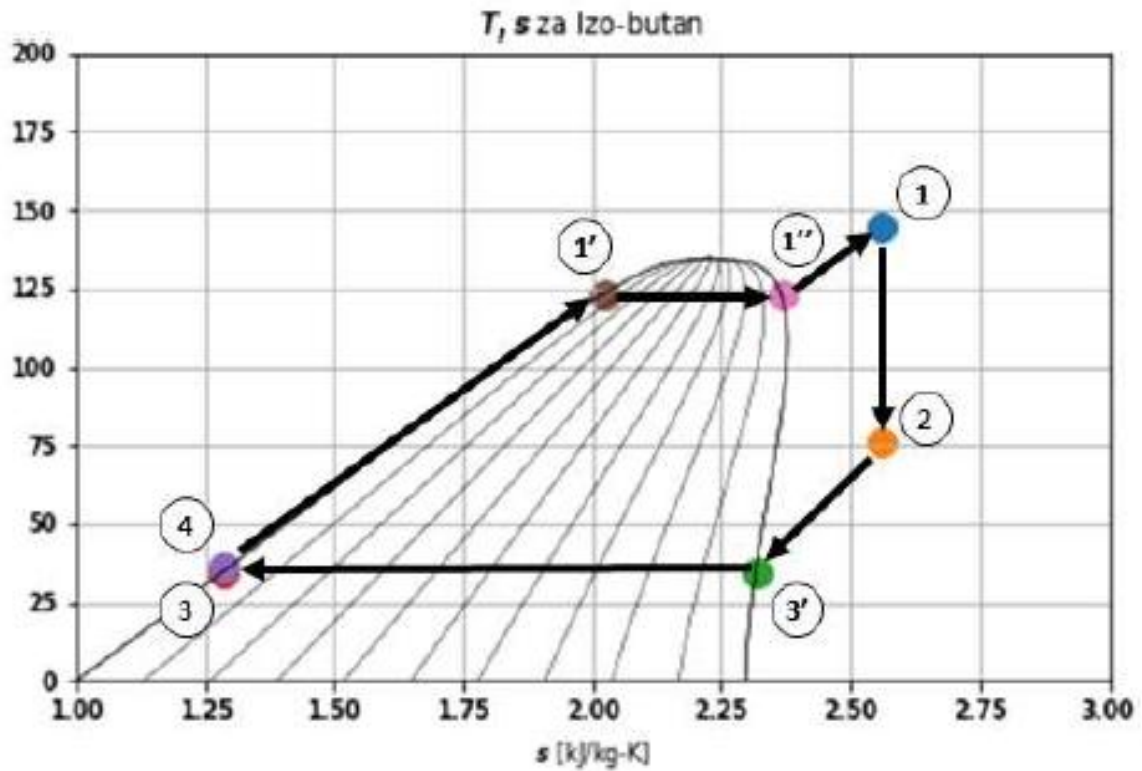
$$h_4 = h_3 + w_{p,ORC} \quad (4.31)$$

Stanje 1' i 1''

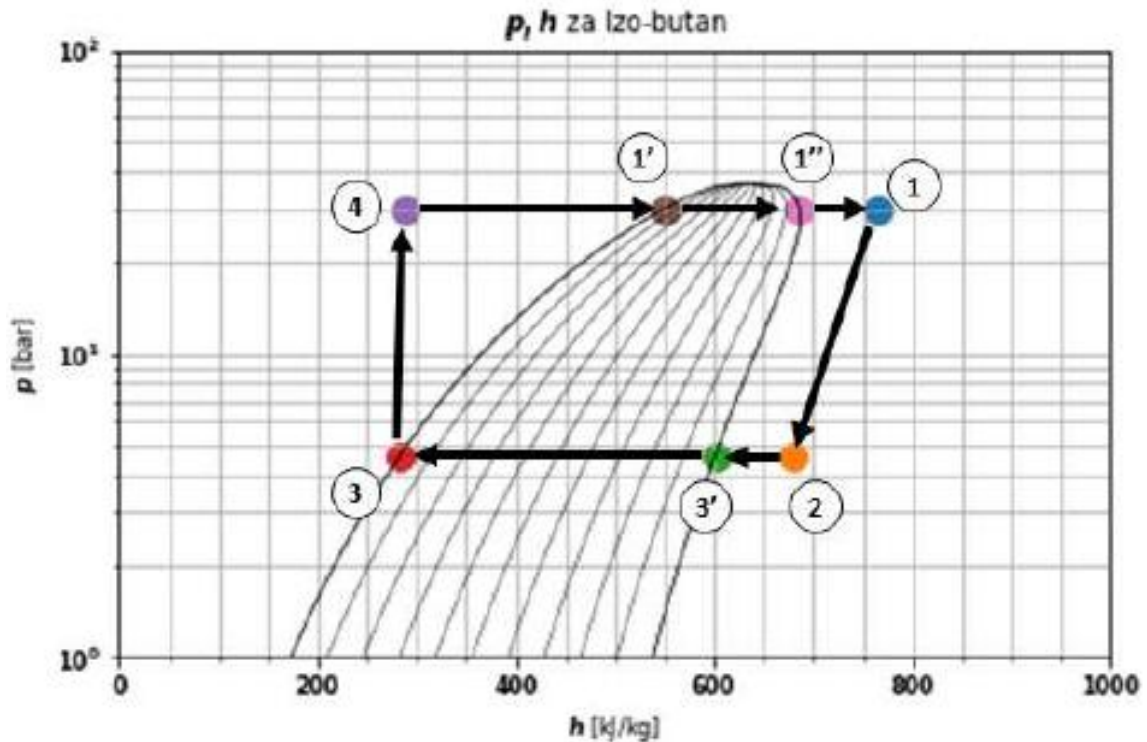
Stanje 1' označava stanje na izlazu iz zagrijača, dok stanje 1'' označava stanje na izlazu iz isparivača. Temperatura i entalpija se očitavaju iz dijagrama, dok je tlak poznat.

- $p_{1'} = p_{1''} = p_4 = p_1$
- $T_{1'} = T_{1''}$
- $h_{1'}$
- $h_{1''}$

Dobivena termodinamička stanja i procesi mogu se skicirati u T-s i p-h dijagramima (za radni fluid, u ovom primjeru izobutan), što je prikazano u grafičkim priložima 4-7 i 4-8. Brojevima i slovima su označena karakteristična termodinamička stanja koja su prethodno opisana. Vrijednosti na dijagramima su informativnog karaktera.



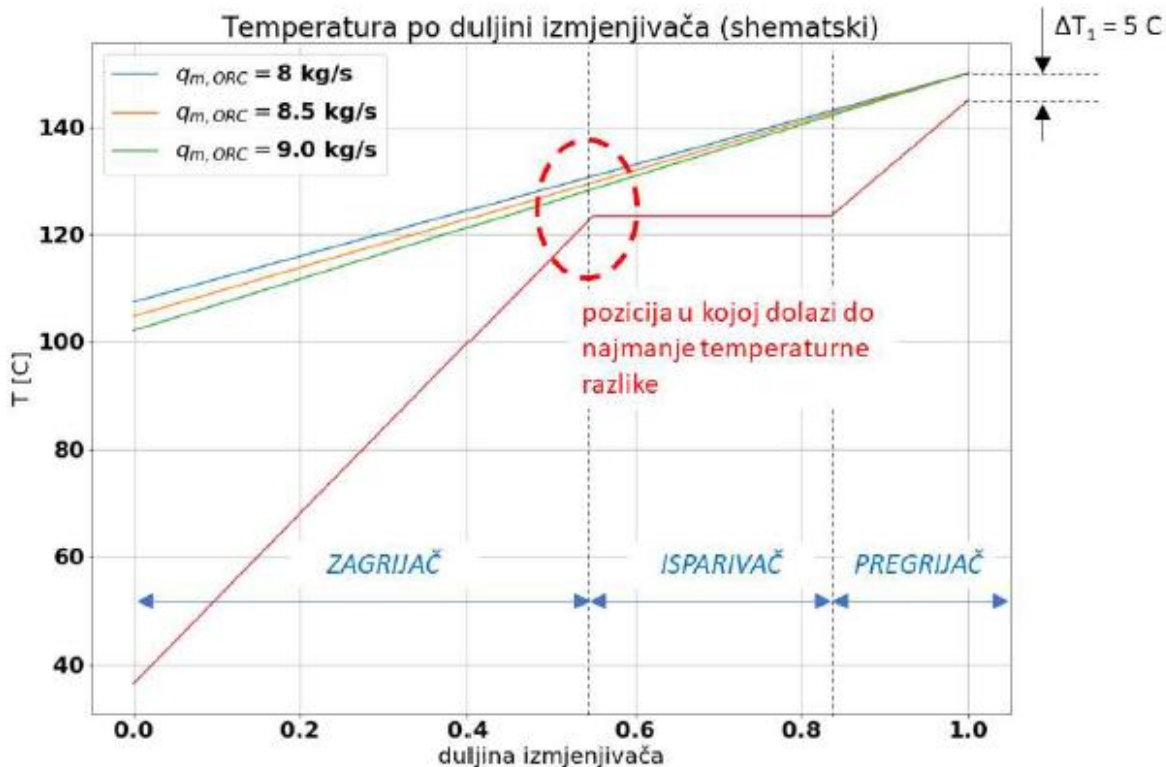
Grafički prilog 4-7. T-s dijagram radnog procesa za izobutan pri ORC procesu (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)



Grafički prilog 4-8. p-h dijagram radnog procesa za izobutan pri ORC procesu (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

Kako bi se izračunala snaga i toplinski tokovi unutar ORC procesa, kao i snaga na pragu ORC elektrane, mora se pronaći maseni protok sekundarnog (ORC) fluida. Općenito, povećanjem protoka sekundarnog fluida smanjuje se izlazna temperatura vode na izlazu iz izmjenjivača. Ako je taj protok prevelik, u nekoj poziciji izmjenjivača će temperatura primarnog fluida biti za manje od $\Delta T_{\text{pinch,IZ}}$ veća od temperature sekundarnog fluida, što prema specifikaciji zadatka nije dozvoljeno.

Do masenog protoka sekundarnog fluida ($q_{m,\text{ORC}}$) dolazi se iterativnim postupkom, koji se može prikazati grafičkim prilogom 4-9. Iterativni postupak završava kad se dobije najmanja razlika temperatura (koja iznosi točno $\Delta T_{\text{pinch,IZ}}$) između primarnog i sekundarnog fluida. Pozicija na kojoj dolazi do najmanje temperaturne razlike između primarnog i sekundarnog fluida nalazi se na izlazu iz zagrijača. Vrijednosti na dijagramima su informativnog karaktera.



Grafički prilog 4-9. Iterativni postupak određivanja $q_{m,ORC}$ (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

Iz gore navedenih podataka može se izračunati snaga na pragu elektrane ($P_{el,ORC}$). U jednadžbi 4-32 $P_{T,ORC}$ označava snagu turbine, $P_{p,ORC}$ snagu pumpe ORC fluida, P_p snagu utisne pumpe i $P_{ACHE,ORC}$ snagu ACHE jedinica (ventilatora za rashlađivanje geotermalnog fluida pri kondenzaciji). η_g (učinkovitost generatora) i η_t (učinkovitost turbine) dodani su jednadžbi 4-33 kako bi se dobio približno točan rezultat neto proizvedene električne energije. Pretpostavljena vrijednost η_g je 96%, dok za η_t pretpostavljena vrijednost je 82%.

$$P_{el,ORC} = P_{T,ORC} - P_{p,ORC} - P_p - P_{ACHE,ORC} \quad (4-32)$$

$$P_{T,ORC} = (q_{m,ORC} * (h_1 - h_2)) * \eta_g * \eta_t \quad (4-33)$$

$$P_{p,kond} = q_{m,ORC} * w_{p,ORC} \quad (4-34)$$

$$P_p = q_{v,H_2O} * (p_{iw} - p_{pw}) * 10^5 \quad (4-35)$$

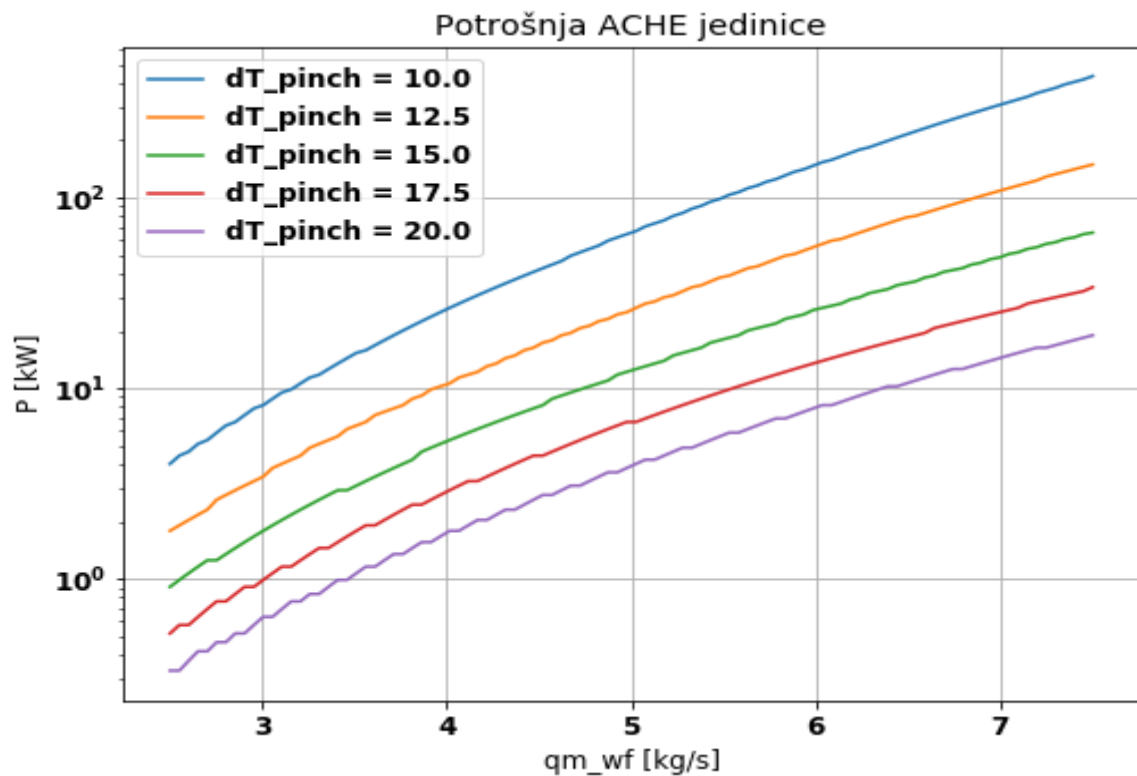
P_{ACHE} se određuje prema radnoj krivulji ACHE jedinice za radni fluid (u primjeru je korišten izobutan).

Potrošnja ventilatora određuje se iz zadane pinch temperature i masenog protoka kroz pojedini ventilator. Ovdje treba napomenuti da je kondenzacija potpuna, jel ekspanzija radnog fluida završava u jednofaznom području, iza linije zasićenja ($x=1$).

$$q_{m,ACHE,ORC,r} = q_{m,ACHE,ORC,korig} = q_{m,ORC} / N_v \quad (4-36)$$

Nakon toga sa zadanim i proračunatim parametrima ($q_{m,ACHE,korig}$, ΔT_{pinch}) se prema grafičkom prilogu 4-10 procjenjuje utrošak jedne ACHE jedinice (P_v), te se za ukupnu snagu ACHE jedinica (jednadžba 4-37) množi snaga pojedinog ventilatora (P_v) sa brojem ACHE jedinica koji je zadan (N_v).

$$P_{ACHE,ORC} = N_v * P_v \quad (4-37)$$



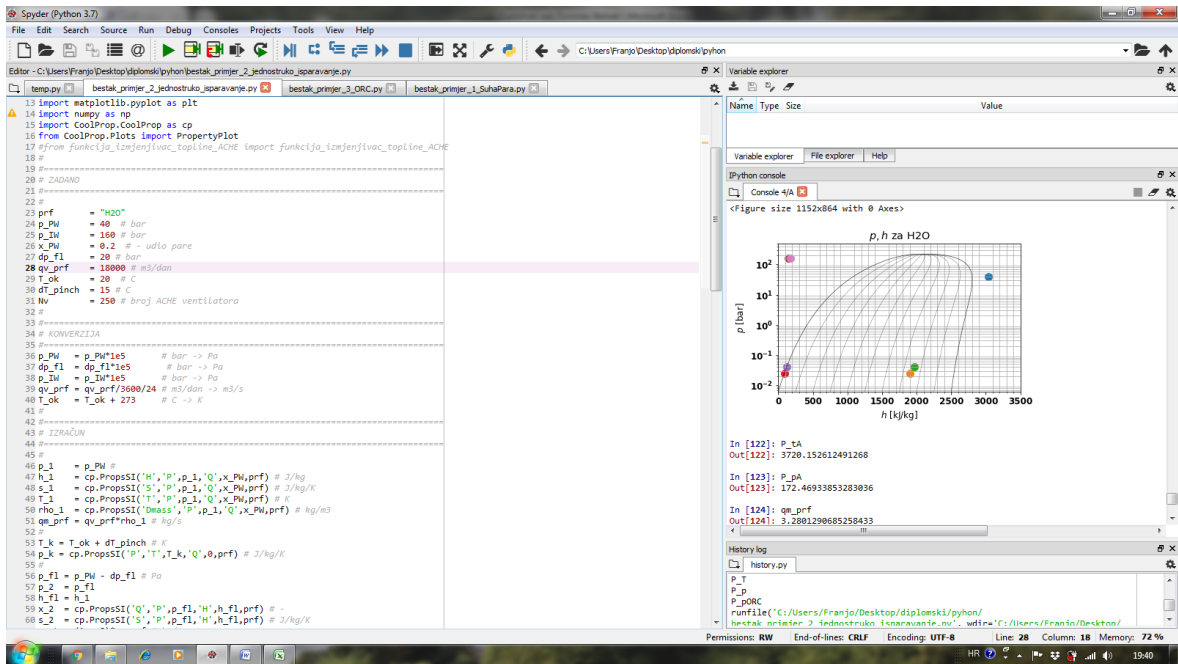
Grafički prilog 4-10. ACHE mapa za H₂O (interna skripta kolegija Osnove strojarstva, 2018.)

5. ANALIZA SLUČAJA I REZULTATA

Tablica 5-1 sadrži ulazne podatke za sve tri vrste geotermalnih elektrana. Cilj ovih zadataka je usporediti po učinkovitosti konverzije ($\eta_{kon,el}$) i po proizvedenoj snazi električne energije (P_{el}) različite vrste geotermalnih elektrana na osnovu djelomično identičnih ulaznih podataka (koji su tablici 5-1 označeni crvenom bojom) kod sva tri tipa geotermalnih elektrana. Tablica 5-1 prikazuje dobivene rezultate za sva tri tipa geotermalnih elektrana. Za proračune su korišteni računalni programi „Python“ i „Excel“. Učinkovitost konverzije geotermalnih elektrana je omjer neto proizvedene snage električne energije (kWe) i proizvedene snage toplinske energije iz ležišta (kWth), što je prikazano na grafičkom prilogu 5-1. Slika 5-1 prikazuje isječak proračuna iz navedenog programa. Grafički prilog 5-2 prikazuje neto proizvedenu snagu električne energije za različite tipove geotermalnih elektrana.

| ULAZNI PODACI | VRSTA ELEKTRANE | | |
|----------------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| | PROCES SUHE PARE | PROCES S JEDNOSTRUKIM ISPARAVANJEM | BINARNI PROCES |
| p_{pw} (bar) | 40 | 40 | 40 |
| p_{iw} (bar) | 160 | 160 | 160 |
| q_m (kg/s) | 208 | 208 | 208 |
| T_{pw} (°C) | 330 | / | 175 |
| ΔT_{pinch} (°C) | 10 | 15 | 15 |
| T_{ok} (°C) | 10 | 20 | 0 |
| x_{pw} | / | 0,2 | / |
| Δp_{FL} (bar) | / | 20 | / |
| N_v | 300 | 250 | 20 |
| $\Delta T_{pinch,IZ}$ (°C) | / | / | 5 |
| RADNI FLUID | H ₂ O | H ₂ O | H ₂ O / IZOBUTAN |

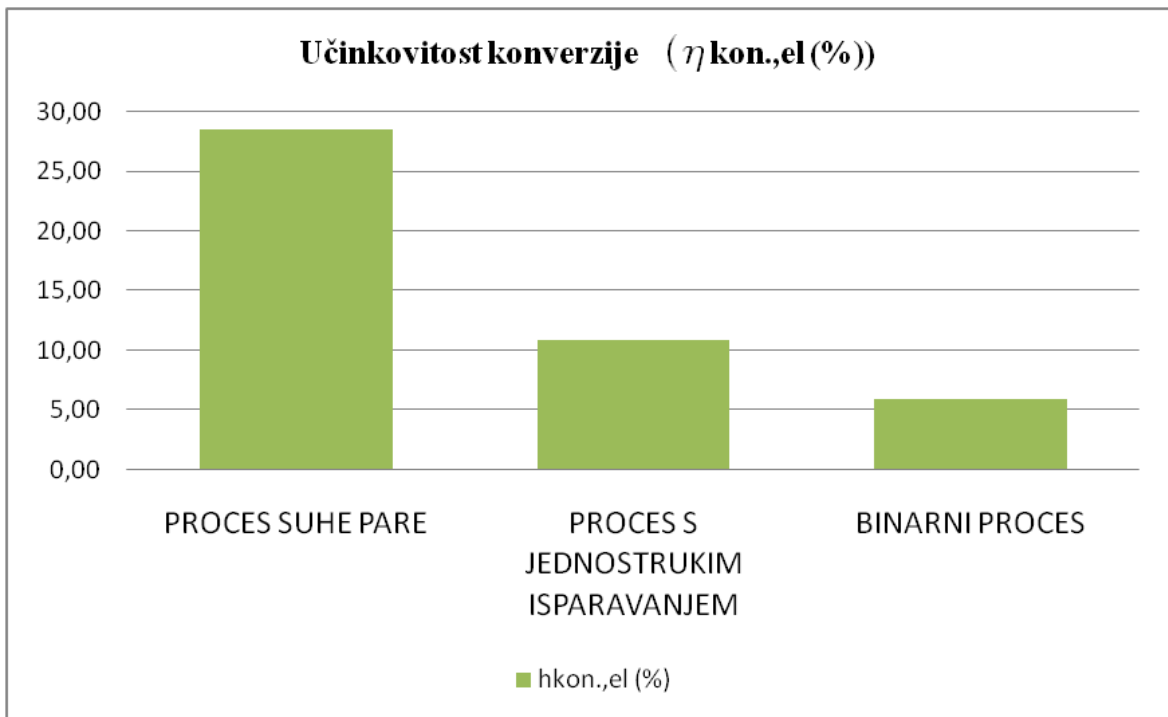
Tablica 5-2. Ulazni podaci za sva tri tipa geotermalnih elektrana (Excel, 2019.)



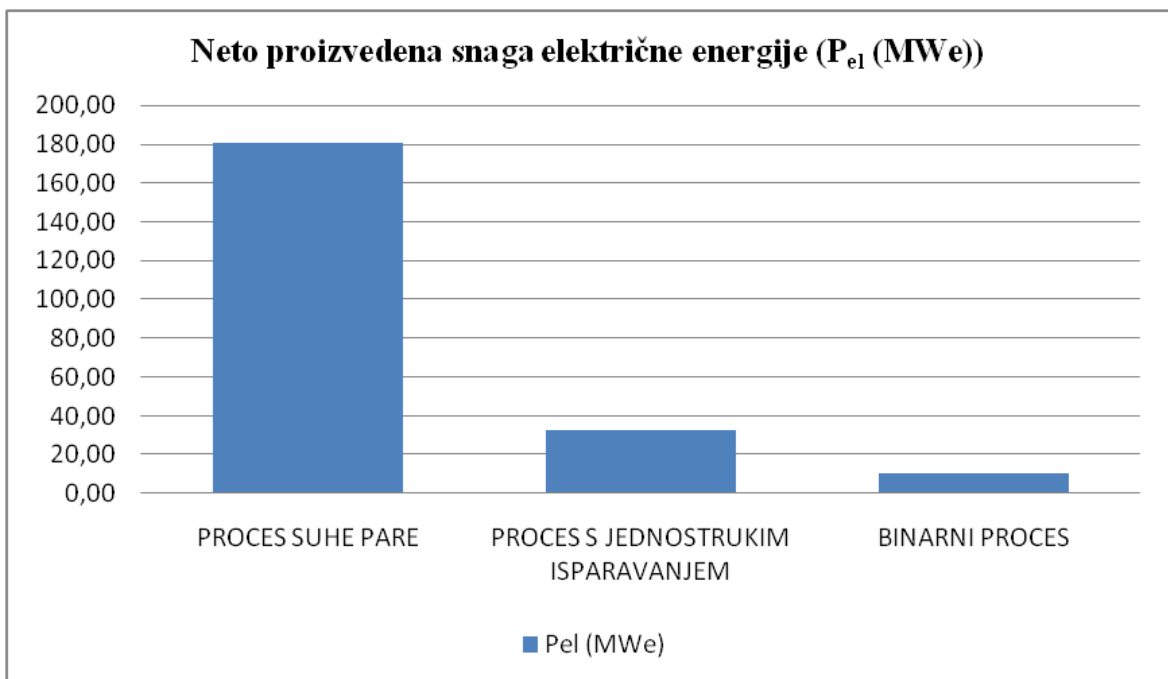
Slika 5-1. Isječak proračuna iz programa „Python“

| REZULTATI | VRSTA ELEKTRANE | | |
|------------------------------|------------------|------------------------------------|----------------|
| | PROCES SUHE PARE | PROCES S JEDNOSTRUKIM ISPARAVANJEM | BINARNI PROCES |
| P_t (kW) | 186.717,78 | 38.636,52 | 13.935,91 |
| P_p (kW) | 3.333,54 | 3.426,69 | 2.790,56 |
| P_{ACHE} (kW) | 2.686,27 | 2.538,57 | 139,76 |
| P_{PM} (kW) | | 115,20 | |
| $P_{D,ORC}$ (kW) | | | 693,92 |
| h_{1W} (kJ/kg) | 3.042,10 | 1.430,16 | 835,56 |
| | | | |
| P_{el} (MW _e) | 180,70 | 32,56 | 10,31 |
| | | | |
| P_{th} (MW _{th}) | 632,76 | 297,47 | 173,80 |
| | | | |
| $\eta_{kon,el}$ (%) | 28,56 | 10,94 | 5,93 |

Tablica 5-3. Prikaz izračunatih rezultata za sva tri tipa geotermalnih elektrana (Excel, 2019.)



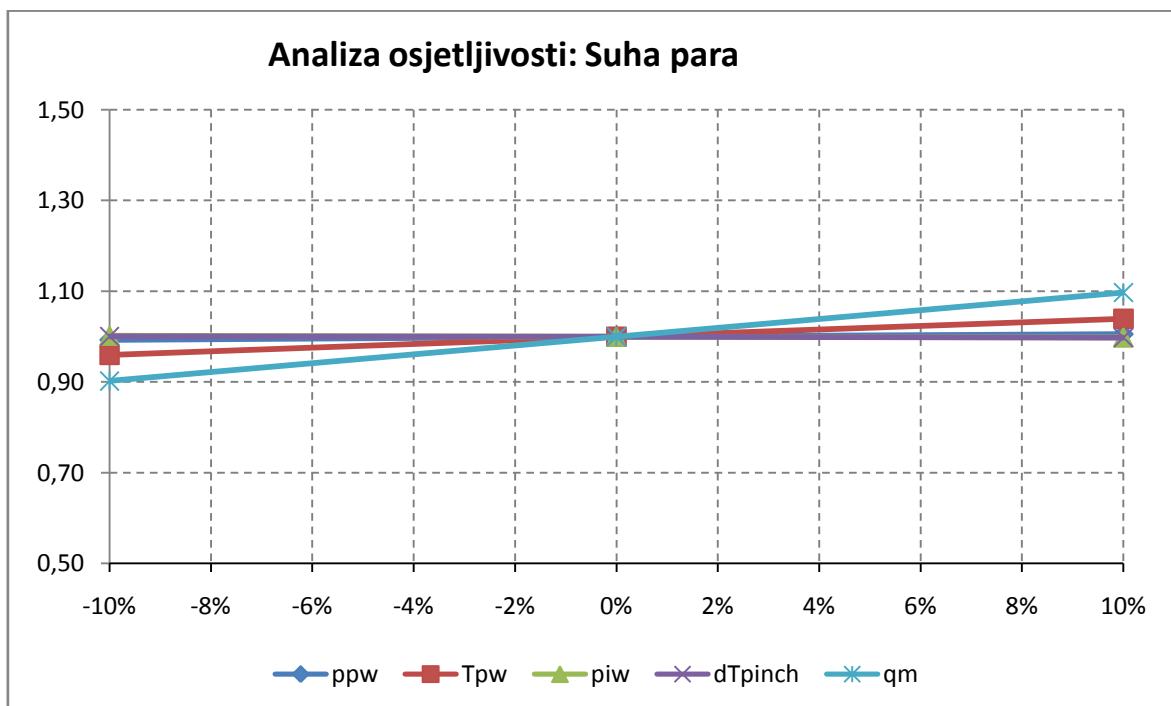
Grafički prilog 5-1. Učinkovitost konverzije različitih tipova geotermalnih elektrana (Excel, 2019.)



Grafički prilog 5-2. Neto proizvedena snaga električne energije različitih tipova geotermalnih elektrana (Excel, 2019.)

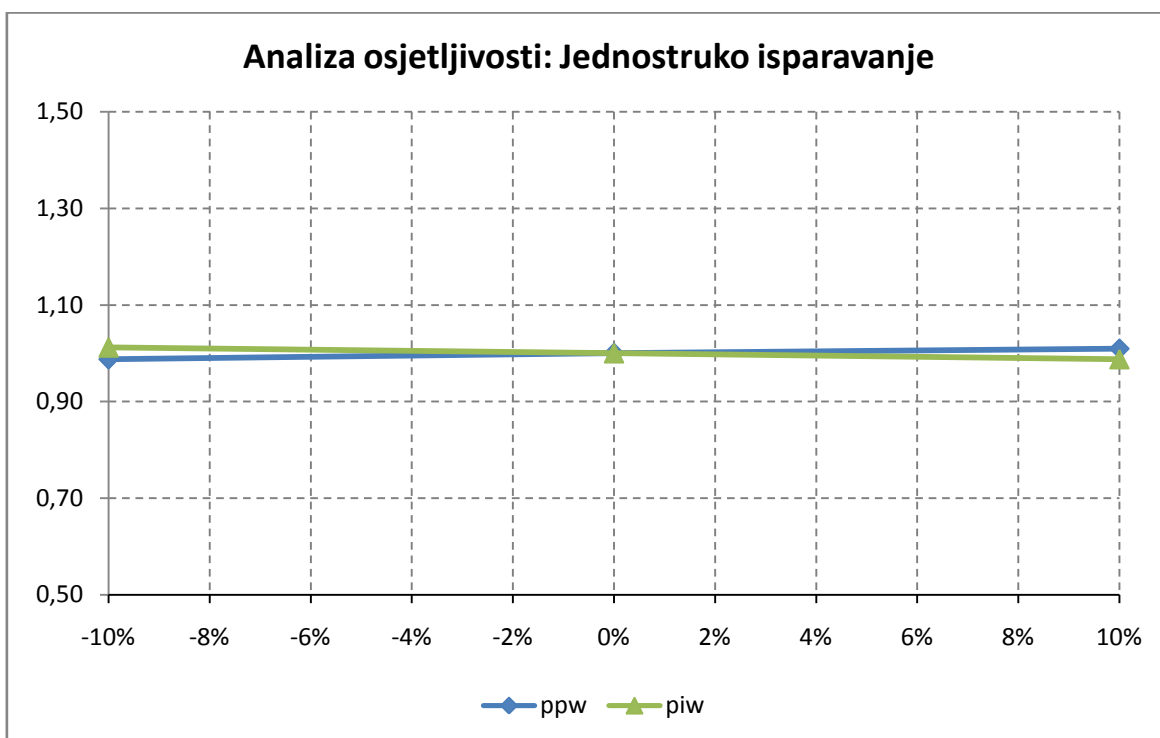
Napravljena je analiza osjetljivost gdje se vidi kako promjene pojedinih parametara, kao što su p_{pw} , T_{pw} , p_{iw} , ΔT_{pinch} te q_m , utječu na promjenu proizvedene snage električne energije. Analiza osjetljivosti je prikazana za svaki pojedini tip elektrane, i to; za postrojenje s procesom suhe pare na grafičkim prilogu 5-3, zatim za postrojenje s jednostrukim isparavanjem na grafičkom prilogu 5-4 te za postrojenje s binarnim procesom na grafičkom prilogu 5-5.

Kod procesa suhe pare, analizom osjetljivosti je utvrđeno kako na promjenu neto proizvedene snage električne energije najviše utječe maseni protok geotermalnog fluida (q_m), pri čemu povećanje masenog protoka za 10% rezultira deset postotnim povećanjem neto proizvedene snage električne energije. Povećanje temperature geotermalnog fluida (T_{pw}) za 10% povećava neto proizvedenu snagu električne energije za otprilike pet posto, dok povećanje tlaka na proizvodnoj bušotini (p_{pw}) za 10%, zanemarivo povećava neto proizvedenu snagu električne energije, oko 0,5%. Pinch temperatura (ΔT_{pinch}) i tlak na utisnoj bušotini (p_{iw}) su obrnuto proporcionalni sa neto proizvedenom snagom električne energije, što znači da povećanjem tih parametara dolazi do blagog smanjenja neto proizvedene snage električne energije.



Grafički prilog 5-3. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s procesom suhe pare (Excel, 2019.)

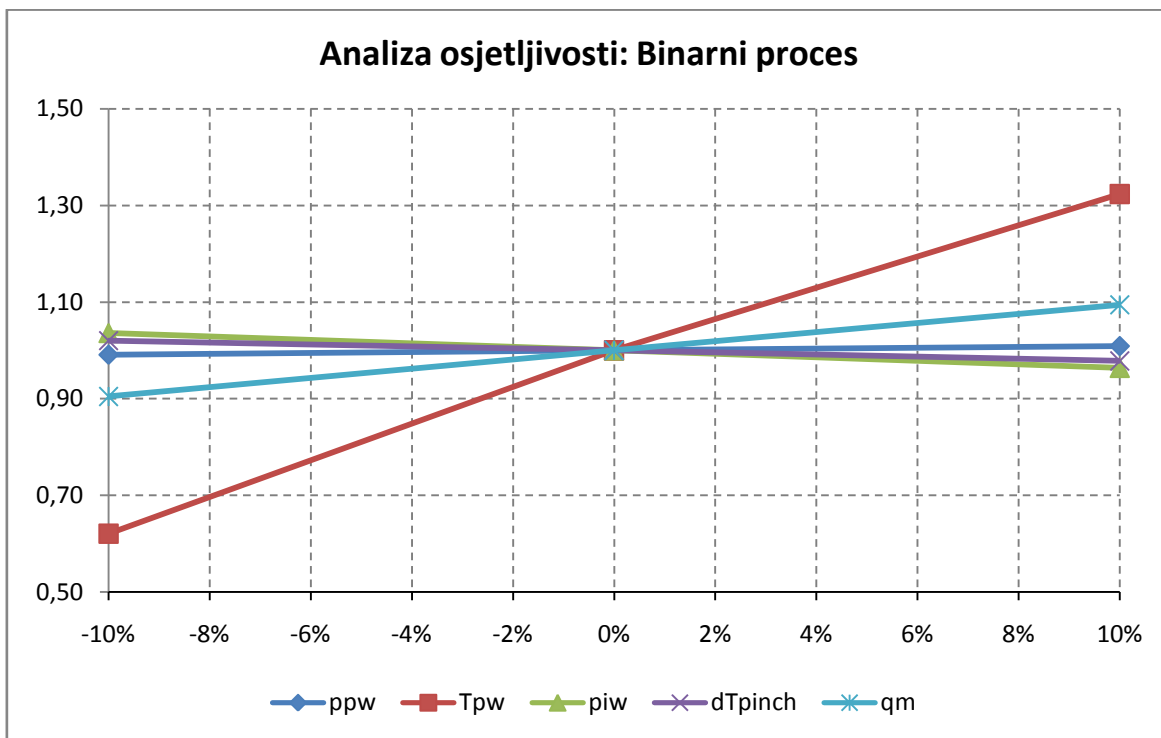
Na grafičkom prilogu 5-4 prikazana je promjena samo dva parametra (p_{pw} i p_{iw}), dok se promjenom ostalih parametara dobivaju rezultati koji su u koliziji sa zadanim ulaznim podacima, te ih je stoga nemoguće prikazati. Vidljivo je kako povećanje tlaka na proizvodnoj bušotini (p_{pw}) za 10%, blago povećava neto proizvedenu snagu električne energije (oko 1%), dok povećanjem tlaka na utisnoj bušotini (p_{iw}) dolazi do blagog pada neto proizvedene snage električne energije (za oko 1%).



Grafički prilog 5-4. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s jednostrukim isparavanjem(Excel, 2019.)

Kod binarnog procesa, analizom osjetljivosti je utvrđeno kako na promjenu neto proizvedene snage električne energije najviše utječe temperatura geotermalnog fluida (T_{pw}), pri čemu povećanje temperature za 10% rezultira otprilike trideset tri postotnim povećanjem neto proizvedene snage električne energije. Povećanje masenog protoka geotermalnog fluida (q_m) za 10% povećava neto proizvedenu snagu električne energije za otprilike deset posto, dok povećanje tlaka na proizvodnoj bušotini (p_{pw}) za 10%, blago povećava neto proizvedenu snagu električne energije, oko 1%. Pinch temperatura (ΔT_{pinch}) i tlak na utisnoj bušotini (p_{iw}) su obrnuto proporcionalni sa neto proizvedenom snagom

električne energije, što znači da povećanjem tih parametara dolazi do blagog smanjenja neto proizvedene snage električne energije.



Grafički prilog 5-5. Utjecaj promjene parametara na neto proizvedenu snagu elektrane s binarnim procesom(Excel, 2019.)

6. ZAKLJUČAK

U prethodnom poglavlju dobiveni su rezultati analize slučaja, koji su prikazani tablicom 5-2. Prema tablici 5-2 napravljeni su grafički prilozi 5-1 i 5-2, gdje je vidljivo da najveću učinkovitost konverzije ima postrojenje s procesom suhe pare, koja iznosi 28,56%, nadalje slijedi postrojenje s jednostrukim isparavanjem, koje ima učinkovitost konverzije od 10,94%, te najmanju učinkovitost konverzije ima postrojenje s binarnim procesom (5,93%).

Što se tiče proizvedene snage električne energije, vidljivo je kako postrojenje s procesom suhe pare proizvodi najveću snagu, koja iznosi 180,70MWe. Nakon njega slijedi postrojenje s jednostrukim isparavanjem, koje proizvodi električnu snagu od 32,56MWe, dok najmanju snagu od 10,31MWe proizvodi postrojenje sa binarnim ciklusom.

Analizom osjetljivosti dolazi se do zaključka kako povećanjem tlaka na proizvodnoj bušotini (p_{pw}), zatim temperature na proizvodnoj bušotini (T_{pw}) i masenog protoka geotermalnog fluida (q_m) dolazi do povećanja neto proizvedene snage električne energije, dok povećanjem ostalih dvaju parametara, pinch temperature (ΔT_{pinch}) te tlaka utiskivanja geotermalnog fluida (p_{iw}) dolazi do smanjenja neto proizvedene snage električne energije. Treba napomenuti kako kod procesa suhe pare povećanjem masenog protoka geotermalnog fluida (q_m) najviše raste neto proizvedena snaga električne energije (Grafički prilog 5-3), dok kod binarnog procesa, na rast neto proizvedene snage električne energije najviše utjeće povećanje temperature geotermalnog fluida (T_{pw}) (Grafički prilog 5-5).

7. LITERATURA

1. TAYLOR, P., LAVAGNED'ORTIGUE, O., TRUDEAU, N., FRANCOEUR, M., 2008. Energy efficiency indicators for Public Electricity Production from fossil fuels.
2. V. PALL, Geothermal Power Plant Cycles and Main Components, Present. "Short Course Geotherm. Drilling, Resour. Dev. Power Plants", Organ. by UNU-GTP La Geo, St. Tecla, El Salvador, 2011, pp. 1–24.
3. AUSTRALIAN GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION (AGEA), 2010. The geothermal reporting code. In: The Australian Code for Reporting of Exploration Results, Geothermal Resources and Geothermal Reserves. 2nd edition, pp. 34.
4. BERTANI, R., 2010. Geothermal power generation in the world 2005–2010 update report. In: World Geothermal Congress, Bali
5. ANEKE, M., AGNEW, B., UNDERWOOD, C., 2011. Performance analysis of the Chena binary geothermal power plant. *Applied Thermal Engineering* 31, 1825–1832.
6. DICKSON, M.H., FANELLI, M., 2003. *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Routledge, ISBN-10: 1844071847, ISBN-13: 978-1844071845.
7. IEA, 2007. *Electricity Information 2007*: OECD Publishing. International Energy Agency.
8. KAYA, E., ZARROUK, S.J., O'SULLIVAN, M.J., 2011. Reinjection in geothermal fields: a review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 47–68.
9. J.W. LUND, Characteristics, development and utilization of geothermal resources, *Geo-Heat Cent. Q. Bull.* 28 (2007) 1–9.
10. H. GUPTA, S. ROY, *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*, Elsevier Science, The Netherlands, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, OX5 1GB, Oxford, UK, 2007.
11. R. BERTANI, Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report, *Geothermics* 60 (2016) 31–43.
12. E. SANTOYO, E. VERMA, S.P. NIEVA, D.E. Portugal, Variability in the gas phase composition of fluids discharged from Los Azufres geothermal field, Mexico, *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 47 (1991) 161–181.
13. I. RICHARDSON, S. ADDISON, R. LAWSON, Chemistry challenge sin geothermal power generation, *Power Plant Chem.* 1 (2015) 1–17.

14. K. BREEDE, K. DZEBISASHVILI, X. LIU, G. FALCONE, A systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: past, present and future, *Geothermal Energy* 1 (2013) 1–27.
15. SIMSEK, S., YILDIRIM, N., GULGOR, A., 2005. Developmental and environmental effects of the Kizildere geothermal power project, Turkey. *Geothermics* 34, 234–251.
16. VORUM, M., FITZLER, E., 2000. Comparative Analysis of Alternative Means for Removing Noncondensable Gases from Flashed-steam Geothermal Power Plants. National Renewable Energy Lab, Golden, CO, USA.
17. HUDSON, R.B., 1988. Technical and economic overview of geothermal atmospheric exhaust and condensing turbines binary cycles and biphash plant. *Geothermics* 17, 51–74.
18. MENDRINOS, D., KONTOLEONTOS, E., KARYTSAS, C., 2006. Geothermal binary plants: water or air cooled. In: ENGINE Workshop 5 on Electricity Generation from Enhanced Geothermal Systems, Strasbourg, France, 14–16 September.
19. ZARROUK, S.J., 2011. Geothermal energy technology. In: Lecture. University of Auckland.
20. DIPIPPA, R., Energy, U.S.D.o.E.D.o.G., 1978. Geothermal Power Plants of Japan: A Technical Survey of Existing and Planned Installations. US Department of Energy, Geothermal Energy
21. S.J. ZARROUK, H. MOON, 2014. Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review, *Geothermics* 51 (2014.) 142–153
22. PERKOVIĆ, L., Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2018., Interna skripta kolegija Osnove strojarstva, Sveučilište u Zagrebu

Internetski izvori

1. FLICKR, 2019.

URL: [https://www.flickr.com/photos/pagemacrae/4471330527\(12.07.2019.\)](https://www.flickr.com/photos/pagemacrae/4471330527(12.07.2019.))

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu i služeći se navedenom literaturom.

Tomislav Beštak
