Korištenje geotermalne energije za proizvodnju električne energije

Petrović, Marija Helena

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:169:122672

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

KORIŠTENJE GEOTERMALNE ENERGIJE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Marija Helena Petrović
R4169

Zagreb, 2021.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Završni rad

KORIŠTENJE GEOTERMALNE ENERGIJE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Marija Helena Petrović

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Organski Rankine-ov ciklus je tehnologija dobivanja energije iz geotermalnog ležišta. Zasniva se na preuzimanju energije u izmjenjivaču topline sa primarnog fluida (geotermalnog fluida) na sekundarni fluid (radni fluid niskog vrelišta). U ovom radu, pomoću Python skripte, izrađen je proračun kojim smo vizualizirali T-s dijagram i p-h dijagram ORC, dijagram energetskih tokova te P-T dijagram ACHE jedinica.

Ključne riječi: geotermalna energija, ORC, učinkovitost, temperatura, turbina, kondenzator

Završni rad sadrži: 24 stranice, 2 tablica, 15 slika, 0 priloga, i 6 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: izv. prof. dr. sc. Luka Perković

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Luka Perković
prof. dr. sc. Tomislav Kurevija
doc. dr. sc. Tomislav Korman

Datum obrane: 17.09.2021., Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Sadržaj

Popis slika I

Popis korištenih jedinica i oznaka II

Popis tablica III

Popis kratica IV

1. Uvod 1

2. Geotermalna energija 2

2.1. Organski Rankineov ciklus (ORC) 2

2.1.1. Radna tekućina, temperatura izvora i turbine u ORC 4

2.2. Učinkovitost geotermalne elektrane 5

2.3. Faktori koji utječu na učinkovitost 6

2.3.1. NCG (*non condensable gases*) 6

2.3.2. Parazitsko opterećenje 6

2.3.3. Gubitak topline 6

2.3.4. Učinkovitost turbine 7

2.3.5. Učinkovitost generatora 7

2.4. Ostali geotermalni energetski sustavi 7

2.5. Najveća geotermalna žarišta na Zemlji 8

3. Metoda proračuna 10

4. Analiza rezultata 15

4.1. Rezultati iz literatura 18

5. Zaključak 23

6. Literatura 24

Popis slika

Slika 1 Shema ORC 3

Slika 2 T-s dijagram ORC 4

Slika 3 Učinkovitost geotermalne elektrane u usporedbi s ostalim termoelektranama (Zarrouk & Moon 2013) 5

Slika 4 Jednostavni sustav geotermalne toplinske pumpe za jedno kućanstvo (U.S. Energy information administration EIA 2021) 8

Slika 5 Skup podataka može se koristiti za izradu karata kao što je ovaj pregled aktivnih geotermalnih elektrana u cijelom svijetu (do kraja 2017.) (Uihlein 2018) 9

Slika 6 ACHE dijagram 13

Slika 7 T-s dijagram zadanog oganskog Rankineovog ciklusa 17

Slika 8 p-h dijagram zadanog organskog Rankineovog ciklulsa 17

Slika 9 Dijagram energetskih tokova 18

Slika 10 Ovisnost učinkovitosti Cartonovog i trokutastog ciklusa o temperaturi radnog fluida (Zarrouk & Moon 2013) 19

Slika 11 Ovisnost učinkovitosti o temperaturi primarnog fluida na ušću (Zarrouk & Moon 2013) 19

Slika 12 Ovisnost učinkovitosti o entalpiji primarnog fluida na ušću (Zarrouk & Moon 2013) 20

Slika 13 Ovisnost učinkovitosti o entalpiji ležišta (Zarrouk & Moon 2013) 20

Slika 14 Učinkovitosti različitih vrsta geotermalnih postrojenja i ovisnosti o entalpiji ležišta (Zarrouk & Moon 2013) 21

Slika 15 Područje rada elektrana za različite entalpije ležišta (Zarrouk & Moon 2013) 21

Popis korištenih jedinica i oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
h	kJ/kg	entalpija
N		broj jedinica
η	%	učinkovitost
Φ	kJ/m^3	toplinski tok
P	W	snaga
p	bar	tlak
ρ	kg/m^3	gustoća
q	m^3/s	protok
T	°C	temperatura
W	J	rad

Popis tablica

Tablica 1 Generatori različitih proizvođača i njihove učinkovitosti (Zarrouk & Moon 2013) 7

Tablica 2 Ulazni parametri 16

Popis kratica

ORC	*Organski Rankineov ciklus*	
NGL	*Non Condensable Gases*	Plinovi koji ne kondenziraju

1. Uvod

Duboko ispod zemljine površine nalazi se neiscrpan izvor obnovljive energije. Ljudi koriste geotermalnu energiju već tisućama godina za grijanje i hlađenje. U početku se koristila za kuhanje i na kupalištima, no u današnje vrijeme njezina svrha nalazi se u proizvodnji električne i toplinske energije (National Geographic 2021).

Zemljina kora, koja je pod utjecajem visoke topline preuzete iz polurastopljenog plašta, zagrijava vodu u podzemnim ležištima čak i do 350 °C (Jung & Krumdieck 2012). Na takvim mjestima se grade geotermalne elektrane koje koriste energiju visoko zagrijanog ležišnog fluida za proizvodnju električne energije.

Postoji nekoliko različitih vrste geotermalnih elektrana: binarne elektrane, elektrane s izravnom ekspanzijom suhe pare, elektrane s jednostrukim isparivanjima, te one s višestrukim isparivanjima. Binarne elektrane koriste izvore temperature do 200 °C (Zarrouk & Moon 2013).

Osim geotermalnih elektrana, postoje još dvije vrste geotermalnih energetskih sustava: sustavi izravne uporabe odnosno centralizirani toplinski sustavi te geotermalne toplinske pumpe koji koriste vodu blizu zemljine površine za grijanje vode i zgrada. (U.S. *Energy information administration* 2021)

Geotermalna energija ima nekoliko prednosti. U usporedbi sa elektranama koje koriste fosilna goriva njezina prednost je ta što puno manje zagađuje okoliš. Na primjer, geotermalna postrojenja proizvode samo oko jednu šestinu ugljikovog dioksida kojeg emitiraju elektrane koje koriste prirodni plin. U usporedbi sa solarnim i vjetroelektranama, energija nam je dostupna 365 dana u godini. Najveći nedostatak vidimo u tehničkim i ekonomskim problemima, odnosno u visokim troškovima istraživanja i bušenja te izgradnje same elektrane. (National Geographic 2021)

Ovim završnim radom htjela sam pobliže objasniti termodinamički proces u binarnim elektranama, kojim se dobiva električna energija u takvim elektranama, te o čemu ovisi i kako izračunati korisnost.

2. Geotermalna energija

Radi sigurnosti opskrbe i očuvanja okoliša pojavljuje se sve veći interes za iskorištavanjem obnovljivih izvora energije poput geotermalne, solarne i vjetrene energije te biomase. Geotermalna energija je ogroman izvor topline čija temperatura varira od 50 °C sve do 350 °C. Ležišta visokih temperatura, iznad 220 °C, prikladni su za komercijalnu proizvodnju električne energije elektranama sa suhom parom i jednostrukim ili višestrukim isparivanjima. Ona ispod 220° su više prikladna za binarne elektrane. Međutim, većina ležišta se sastoji od vode niske do umjerene temperature, a ležišni fluid sadrži puno otopljenih minerala. Komercijalni razvoj je, iz tog razloga, bio ograničen na nekoliko vrsta dizajna i veličina postrojenja.

2.1. Organski Rankineov ciklus (ORC)

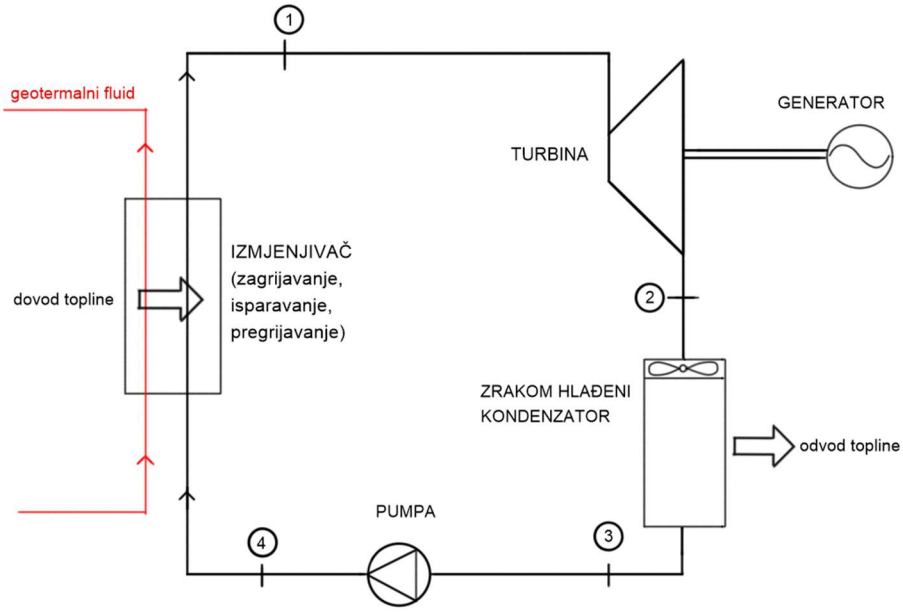
Binarne elektrane rade na principu da se kroz proizvodnu bušotinu na površinu doprema ležišni fluid (primarni fluid) iz dubina zemljine kore gdje je fluid pod visokim tlakom i temperaturom. Kada ležišni fluid dođe do površine, svoju toplinsku energiju predaje nekom sekundarnom radnom mediju (sekundarni fluid) kojeg zagrijava te dolazi do njegovog isparavanja i pregrijavanja. Ta para pokreće turbine koje su spojene na generator koji proizvodi struju. Ohlađeni ležišni fluid se ponovno utiskuje u ležište kako ne bi došlo do smanjenja tlaka ležišta.

Organski Rankineov ciklus je najpoznatija tehnologija za dobivanje energije iz ležišnog fluida niske do umjerene entalpije. Glavni dijelovi tog ciklusa su izmjenjivač, turbina (ekspander), pumpa i zrakom hlađeni kondenzator koji sadrži i ventilator za ostvarivanje prisilne cirkulacije zraka.

Na slici 1. je prikaza je shema ORC ciklusa. Izvor topline je geotermalni, primarni fluid, čiju toplinsku energiju preuzima glavni izmjenjivač (zagrijavanje, isparavanje i pregrijavanje ORC radnog medija) i prenosi je na sekundarni radni medij koji se zatim u plinovitom stanju odvodi do turbina. Ponekad se koristi shema dvije serijski spojene turbine koristi se kako bi se postigao visoki omjer specifičnih volumena na ulazu i izlazu iz turbina. Ekspander je povezan sa vratilom generatora koji proizvodi električnu energiju. Nakon ekspanzije u turbini sekundarni radni fluid ulazi u proces hlađenja u zrakom hlađenim kondenzatorima

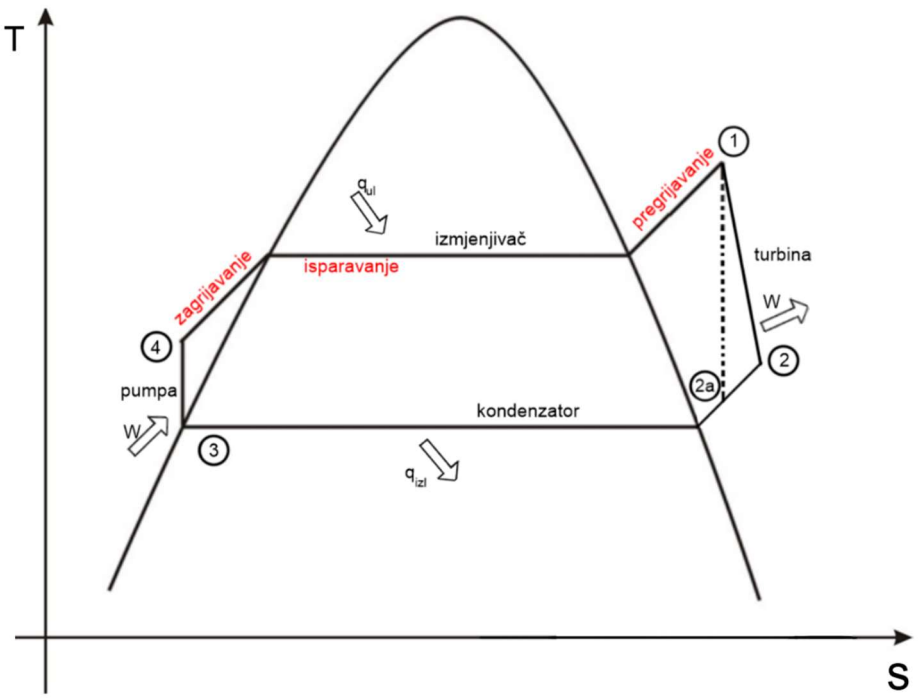
koji ga pretvaraju u kapljevinu, a zatim odlazi u napojnu pumpu koja mu podiže tlak. Proces se ponavlja u zatvorenom termodinamičkom sustavu, gdje predstavlja kružni proces.

Brojevi označuju stadije radnog fluida.



Slika 1 Shema ORC

Termodinamika organskog Rankineovog ciklusa je najbolje prikazana T-s dijagramom (temperatura – entropija).



Slika 2 T-s dijagram ORC

Radna tekućina u stanju 1 ulazi u ekspander kao pregrijana para. U idealnom ciklusu para izentropski ekspandira od stanja 1 do stanja 2a. Iz ekspandera izlazi kao više pregrijana para zbog smanjenja tlaka u procesu. Međutim u stvarnom ciklusu entropija radne tekućine se povećava uslijed nepovratnog procesa tijekom ekspanzije te je dovodi do stanja 2.

Od stanja 2 do 3 pregrijana para prolazi kroz proces hlađenja gdje predaje dio toplinske energije i postaje kapljevina. Ta promjena je izobarna kondenzacija.

Nakon procesa kondenzacije, pothlađena tekućina prolazi kroz pumpu koja ju podiže na nešto viši tlak, od stanja 3 do 4. Prolazi izentropnu kompresiju.

Od stanja 4 do stanja 1 tekućina prolazi izmjenjivačem topline gdje prolazi procese zagrijavanja, isparavanja i pregrijavanja, te ponovno postaje pregrijana para.

Najveći dio vanjskog izvora topline (geotermalna toplina), koji preuzima izmjenjivač, se troši na pretvaranje kapljevine u paru (između stanja 4 i 1). Taj proces je izobarno isparavanje. (Jung & Krumdieck 2012)

2.1.1. Radna tekućina, temperatura izvora i turbine u ORC

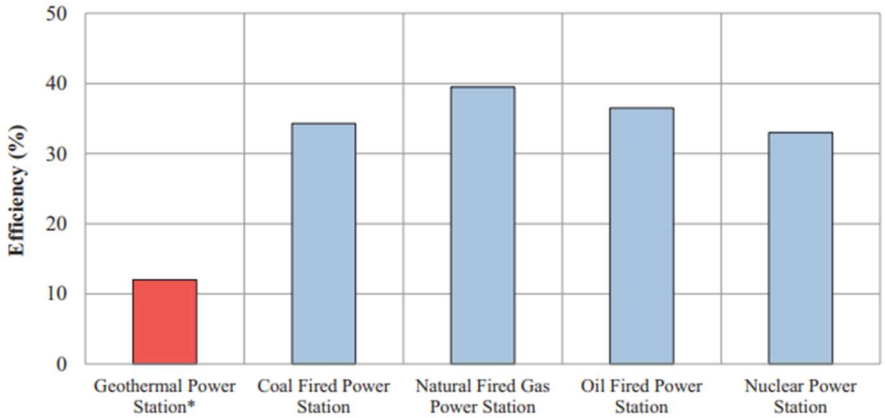
Kod razvoja projekta prva odluka je odabir radne tekućine. Organske radne tekućine imaju različite zahtjeve rukovanja, dostupnost i cijenu. Na temelju istraživanja nije utvrđeno da se

jedan određeni radni fluid ističe kao najbolji za sva rješenja već je bitno poznavati toplinska svojstva velikog izbora radnih fluida kako bi omogućili fleksibilan pristup projektiranju odnosno najbolje rješenje za određene slučajeve.

Također, izbor turbine zahtijeva fleksibilnost modela koji bi se najbolje uklopio u ciklus. Postoje radijalne turbine, aksijalne ili "parne" turbine, suprotno-rotirajuće turbine i vijčane turbine. (Jung & Krumdieck 2012)

2.2. Učinkovitost geotermalne elektrane

Učinkovitost termoelektrane očitavamo u omjeru neto proizvedene električne energije (MW) i proizvedene, odnosno preuzete, geotermalne topline iz ležišta. Geotermalne elektrane imaju manju učinkovitost u odnosu na druge termoelektrane, kao što su to one koje za izvor topline koriste ugljen, prirodni plin i naftu, te nuklearne elektrane. (Zarrouk & Moon 2013)



Slika 3 Učinkovitost geotermalne elektrane u usporedbi s ostalim termoelektranama (Zarrouk & Moon 2013)

Prije svega, na učinkovitost najviše utječe entalpija ležišnog fluida na ušću. Procjenjuje se da samo 10% energije iz ležišnog fluida može biti pretvoreno u električnu energiju. međutim svaka geotermalna elektrana ima vlastitu učinkovitost, što ovisi o brojnim čimbenicima.

Najveća zabilježena učinkovitost pretvorbe iznosi oko 21% (Dajarat model) , a prosječna svjetska učinkovitost termoelektrana iznosi oko 12%.

2.3. Faktori koji utječu na učinkovitost

Geotermalni fluid, koji se doprema iz ležišta, prolazi kroz mnoge procese i/ili različite dijelove opreme na putu do postrojenja. Za to vrijeme geotermalni fluid već gubi dio energije, odnosno entalpije. To je zato što fluid putuje u suprotnom smjeru od gravitacije, postoji trenje između cijevi i fluida, te dio topline je izgubljen u oblozi cijevi koja je okružena hladnim tlom. U prosjeku ti gubitci iznose oko 50-100 kJ/kg entalpije.

Ostali faktori koji utječu na učinkovitost pretvorbe su: sadržaj plina koji se ne može kondenzirati, gubitak topline od opreme, učinkovitost generatora i turbine i parazitsko opterećenje elektrane (ventilatori, crpke, sustavi odvajanja plinova). (Zarrouk & Moon 2013)

2.3.1. NCG (*non condensable gases*)

Za razliku od čiste vodene pare, geotermalna para sadrži plinove koji ne kondenziraju (NCG) u rasponu od gotovo nule do čak 15% mase u nekim geotermalnim ležištima. Ti plinovi ne samo da smanjuju kvalitetu pare, već i povećavaju koroziju, ali i zahtijevaju potrošnju energije kako bi ih se uklonilo iz kondenzatora. NCG se uglavnom sastoji od ugljičnog dioksida (CO_2), sumporovodika (H_2S) i nekih drugih plinova u tragovima (npr: CH_4, H_2, N_2, He, Ar, Ne). Ovaj problem se pojavljuje kod elektrana koje izravno koriste fluid, odnosno paru iz ležišta pomoću koje, sa ili bez separacije, generiraju električnu energiju. To je izbjegnuto kod binarnih elektrana zato što energiju preuzima sekundarni medij.

2.3.2. Parazitsko opterećenje

Hlađenje pare na izlazu iz turbine je nužno kako bi se povećala učinkovitost pretvorbe. Kondenzator zahtijeva crpke i/ili ventilatore. Rashladni toranj suhog tipa, odnosno onaj koji ne koristi vodu već samo ventilatore za prisilnu cirkulaciju zraka, troši dvostruko više električne energije u usporedbi s mokrim rashladnim tornjem. Također zauzima i dvostruko više prostora. Pumpe koje fluid ponovno utiskuju u ležište su isto tako dodatno parazitsko opterećenje. Dio energije tako otpada na pokretanje tih komponenti.

2.3.3. Gubitak topline

Radni fluid također gubi toplinu tijekom protoka u cijevima. To ovisi o veličini cijevi, izolatoru, duljini cijevi i temperaturi okoline. Gubitak topline uzrokuje malo kondenzacije

na dnu cjevovoda koja se odvodi sistemima za odvod. Stoga će doći do gubitka protoka pare koja ulazi u turbinu. Međutim, ovaj gubitak topline je zanemariv. Na primjer 80 t/h pare, na temperaturi od 180 °C, putuje u cijevi promjera 0,4 m i duljini 2,0 km. Cijev je izolirana slojem stakloplastike debljine 8cm te se nalazi u okolini temperature 20 °C. U tom slučaju entalpija ulazne pare iznosi 2777,1 kJ/kg, dok je entalpije izlazne pare 2759,4 kJ/kg. Gubitak energije je samo 0,6%.

Nastojanje tome da cjevovod bude što kraći neće samo smanjiti kapitalne troškove već će i poboljšati učinkovitost postrojenja.

2.3.4. Učinkovitost turbine

Radni fluid u stanju pregrijane pare se odvodi do turbina koje pokreću generator. Učinkovitost turbine pada zbog odstupanja od izentropskog procesa i zbog prisutnosti vlage u turbini tijekom procesa ekspanzije pare. Baumanovo pravilo kaže da prosječna prisutnost vlage od 1% uzrokuje pad učinkovitosti od oko 1%.

2.3.5. Učinkovitost generatora

Učinkovitost generatora ovisi o njegovom kapacitetu snage. Tablica 1. daje informacije o učinkovitostima generatora različitih proizvođača. Iz tablice 1. jasno je da se učinkovitost povećava s veličinom generatora i veličinom geotermalnog postrojenja za koji je predviđena. Ona se kreće između 95.7 i 98.7%.

Proizvođač	Model	Kapacitet snage (MVA)	UČINKOVITOST	
Mitsubishi [33]	S16R-PTAA2	2.2	95,7	
Siemens [34]		SGen5-100A-4P	25-70	do 98,5%
Siemens [34]		SGen5-100A-2P	25-300	Do 98,7 %
GE [35]		W28	550	99%

Tablica 1 Generatori različitih proizvođača i njihove učinkovitosti (Zarrouk & Moon 2013)

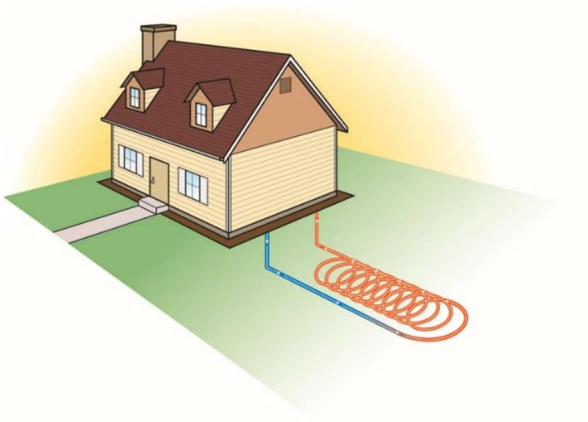
2.4. Ostali geotermalni energetski sustavi

Ovi sustavi koriste toplu vodu iz ležišta koji se nalaze blizu zemljine površine

Sustav izravne uporabe koristile su čak i drevne rimske, kineske i indijanske Termalni izvori služili su im za kupanje, kuhanje i grijanje. Danas se mnogo termalnih izvora još uvijek koristi za kupanje i mnogo ljudi vjeruje da topla voda bogata mineralima ima dobrobiti za zdravlje.

Geotermalna energija se još koristi i za grijanje više građevina pomoću centraliziranih toplinskih sustava. Vruća voda vodi se cjevovodima u zgrade radi grijanja. Također, geotermalna energija može se koristiti i u industrijskoj primjeni za dehidriranje hrane, rudarenje zlata i pasteriziranje mlijeka.

Geotermalne toplinske pumpe koriste konstantne temperature blizu površine kako bi grijale, ali i hladile individualne zgrade. Pumpe prenose toplinu iz zemlje (ili vode) u građevine tijekom zime i obrnuti proces vrše u ljeto.



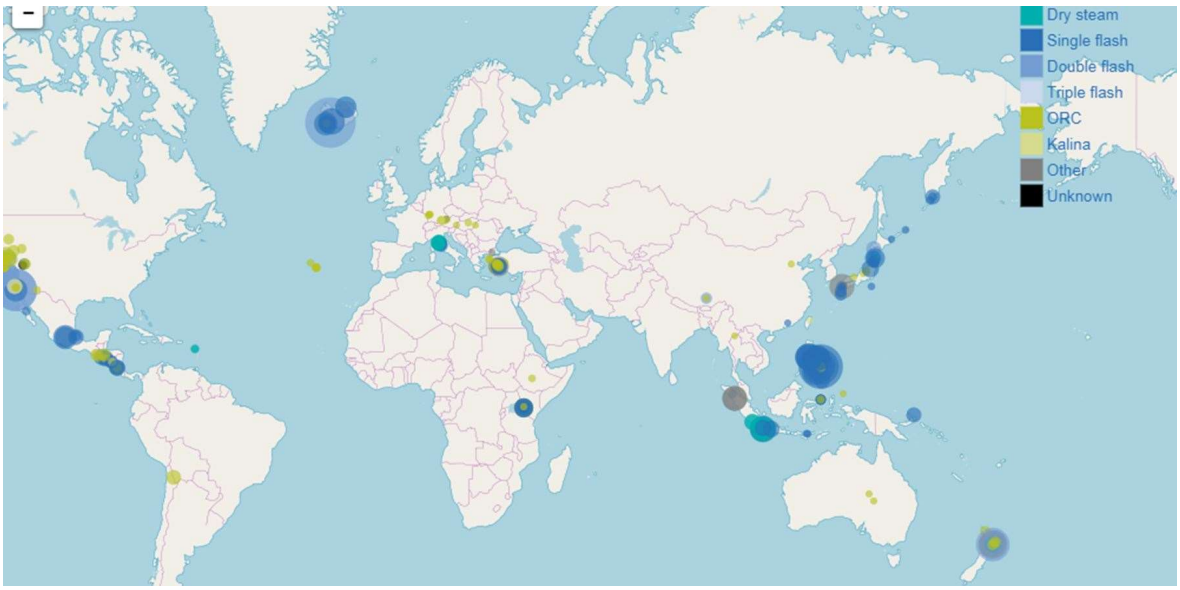
Slika 4 Jednostavni sustav geotermalne toplinske pumpe za jedno kućanstvo (U.S. Energy information administration EIA 2021)

2.5. Najveća geotermalna žarišta na Zemlji

Prema skupu podataka objavljenom 2017. godine, Europska unija je četvrta po geotermalnom energetskom kapacitetu na svijetu i iznosi nešto više od 1 GW, što je dovoljno za napajanje oko 2 milijuna domova. Unutar nje najviše se ističe Italija sa najvećim kapacitetom unutar EU (915 MW), a prate ju Njemačka (30 MW) i Portugal (30 MW). (Uihlein 2018.)

No zemlje čiji je geotermalni energetski kapacitet ipak najveći su SAD sa kapacitetom 3,4 GW, te Filipini (1.8 GW) i Indonezija (1.6 GW)

Također, svjetski kapacitet geotermalne energije se gotovo linearno povećao od 1983. i dosegao gotovo 10,4 GW u 2017. godini.



Slika 5 Skup podataka može se koristiti za izradu karata kao što je ovaj pregled aktivnih geotermalnih elektrana u cijelom svijetu (do kraja 2017.) (Uihlein 2018)

3. Metoda proračuna

Izračun je proveden u Python skripti koju je na korištenje dao mentor.

Primarna radna tvar je voda (H2O), a sekundarna izobutan. Podatke o termodinamičkim svojstvima radnih tvari određujemo pomoću modula CoolProp (Bell i dr. 2014.)

Ulazni podaci za izračun energetskih tokova je baziran na:

- termodinamičkom potencijalu primarnog fluida: ulazna temperatura na proizvodnoj bušotini koja je ujedno i temperatura "ogrijevnog spremnika" (T_{PW}), volumni protok vode ($q_{v,w}$), gustoća (ρ_w) i specifični toplinski kapacitet vode (c_w)
- minimalnoj dopuštenoj temperaturi utiskivanja primarnog fluida na ulazu u utisnu bušotinu ($T_{IW,min}$)
- termodinamičkim parametrima ciklusa sekundarnog fluida: tlaku isparavanja i kondenzacije (p_{isp}, p_k), te maksimalnoj dopuštenoj temperaturi sekundarnog fluida (T_{max})
- parametrima okoliša u vidu temperature okoliša koja je ujedno i temperatura odbacivanja topline, odn. temperatura "rashladnog spremnika" (T_{ok})
- tehnički parametri sustava, kao što su izentropske iskoristivosti pumpe i turbine (η_E, η_p), minimalna temperaturna razlika u izmjenjivačima (ΔT), potrošnja utisne pumpe (P_{utis}) i broj ACHE jedinica (N_{ACHE})

Prije svega moramo pronaći specifični termodinamički ORC ciklus sekundarne tvari koji zadovoljava postavljena ograničenja ciklusa. Ograničenja ciklusa su da maksimalna temperatura sekundarne radne tvari mora biti barem za ΔT manja od temperature primarnog radnog fluida na ulazu T_{PW} i da temperatura kondenzacije T_k mora biti barem za ΔT veća od temperature okoliša T_{ok}.

$$T_{PW} > T_{max} + \Delta T$$

$$T_k > T_{ok} + \Delta T$$

Izentropske iskoristivosti su definirane kao:

$$\eta_E = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2a}} \Rightarrow h_2 = h_1 - \eta_E(h_1 - h_{2a})$$

$$\eta_P = \frac{h_{4a} - h_3}{h_4 - h_3} \Longrightarrow h_4 = h_3 + \frac{(h_{4a} - h_3)}{\eta_P}$$

Pri čemu h_{2a} i h_{4a} predstavljaju vrijednosti nakon izentropske ekspanzije iz stanja 1 na tlak kondenzacije, odn. izentropskog pumpanja iz stanja 3 na tlak isparavanja. Izentropske

efikasnosti utječu na poziciju termodinamičkih stanja nakon ekspanzije u turbini i pumpanja u napojnoj pumpi, tj. pomiču radna stanja u pozitivnom smjeru porasta entropije.

Ovdje treba naglasiti da u skripti jest implementirano i Baumann-ovo pravilo izračuna iskoristivosti ekspanzije ukoliko bi ekspanzija završila u dvofaznom području, ali u svim slučajevima u ovom radu ekspanzija završava u stanju pregrijanog plina ("desno" od linije x=1).

Iz tlakova isparavanja i kondenzacije, kao i izentropskih iskoristivosti turbine (dobivanje spec. rada) i napojne pumpe (utrošak spec. rada) možemo odrediti sva termodinamička stanja (T, p, h i s) u specifičnom ORC ciklusu:

$$T = \{T_1 = T_{max}, T_2, T_{2''} = T_k, T_3 = T_k, T_4, T_{1'} = T_{isp}, T_{1''} = T_{isp}\}$$

$$p = \{p_1 = p_{isp}, p_2 = p_k, p_{2''} = p_k, p_3 = p_k, p_4 = p_{isp}, p_{1'} = p_{isp}, p_{1''} = p_{isp}\}$$

$$h = \{h_1, h_2, h_{2''}, h_3, h_4, h_{1'}, h_{1''}\}$$

$$s = \{s_1, s_2, s_{2''}, s_3, s_4, s_{1'}, s_{1''}\}$$

Nakon što odredimo sva specifična termodinamička stanja, možemo odrediti i specifične energetske veličine:

specifični rad turbine, kJ/kg $\quad w_T = h_1 - h_2$

specifični rad pumpe, kJ/kg $\quad w_p = h_4 - h_{3'}$

specifična dovedena toplina, kJ/kg $\quad q_{dov} = h_1 - h_4$

termodinamička iskoristivost specifičnog ORC ciklusa $\quad \eta^{ORC} = \frac{w_T - w_p}{q_{dov}}$

specifična toplina zagrijavanja, kJ/kg $\quad q_{zag} = h_{1'} - h_4$

specifična toplina isparavanja, kJ/kg $\quad q_{isp} = h_{1''} - h_{1'}$

specifična toplina pregrijavanja, kJ/kg $\quad q_{pr} = h_1 - h_{1'}$

Vrijedi jednakost $\quad q_{dov} = q_{zag} + q_{isp} + q_{pr}$

specifična toplina hlađenja, kJ/kg $\quad q_{hl} = h_2 - h_{2''}$

specifična toplina isparavanja, kJ/kg $\quad q_k = h_{2''} - h_3$

Vrijedi jednakost $\quad q_{odv} = q_{hl} + q_k$

Stvarne energetske veličine možemo odrediti tek onda kada odredimo maseni protok sekundarnog medija ($q_{m,ORC}$). Proces je iterativan, odn. pretpostavimo početni vrijednost, izračunamo energetske tokove te provjerimo da li smo zadovoljili uvjet da je temperatura utisa primarne radne tvari iznad dozvoljene minimalne temperature utisa:

$$T_{IW} > T_{IW,min}$$

Iterativni proračun počinjemo na način da izračunamo energetske tokove sekundarnog medija u glavnom izmjenjivaču:

$$\phi_{zag} = \boldsymbol{q_{m,ORC}}\,(h_{1'} - h_4)$$

$$\phi_{isp} = \boldsymbol{q_{m,ORC}}(h_{1''} - h_{1'})$$

$$\phi_{pr} = \boldsymbol{q_{m,ORC}}(h_1 - h_{1'})$$

Toplina predana sekundarnom radnom mediju je jednaka toplini koju predaje primarni radni fluid (nema gubitaka topline u izmjenjivaču), te je moguće izračunati temperature primarnog medija u svim etapama:

$$T_{w,1''} = T_{w,1} - \frac{\phi_{pr}}{c_w q_{m,w}}$$

$$T_{w,1'} = T_{w,1''} - \frac{\phi_{isp}}{c_w q_{m,w}}$$

$$\boldsymbol{T_{IW}} = T_{w,1'} - \frac{\phi_{zag}}{c_w q_{m,w}}$$

Maseni protok vode odredimo iz umnoška volumnog protoka i gustoće: $q_{m,w}=q_{v,w}\rho_w$.

Nakon što odredimo maksimalni mogući $q_{m,ORC}$, možemo odrediti i tokove snage:

snaga na turbini, kW $\quad P_T = q_{m,ORC} w_T$

snaga na pumpi, kW $\quad P_p = q_{m,ORC} w_p$

dovedena snaga toplinskog toka sekundarnom fluidu, kW $\quad \phi_{dov} = \phi_{zag} + \phi_{isp} + \phi_{pr}$

Za provjeru, na temelju izračunatog mora vrijediti identitet koji bilancira energetske tokove na cjelokupni ciklus izobutana:

$$\phi_{zag} + \phi_{isp} + \phi_{pr} - \phi_{kond} - \phi_{hl} + P_p - P_T = 0$$

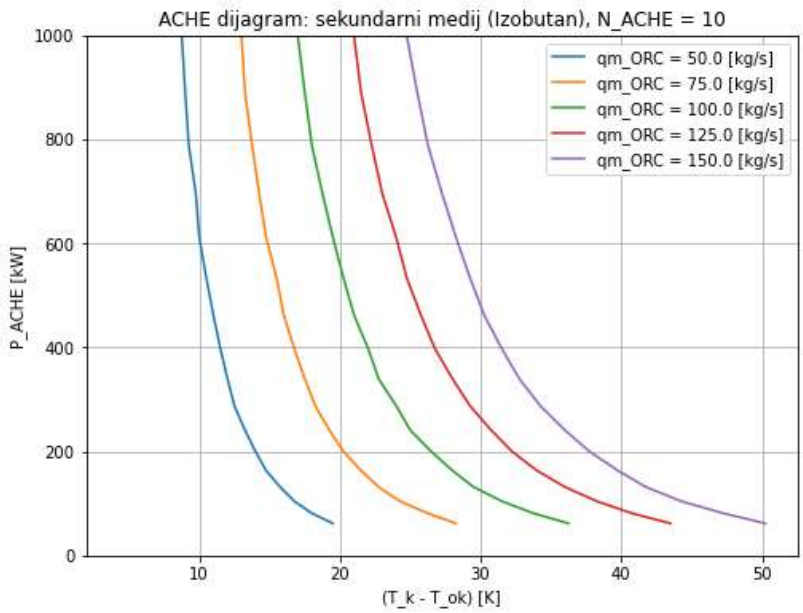
Neto dobivena električna snaga, odn. snaga na pragu elektrane je ona dobivena na turbini koja je umanjena za tzv. parazitska opterećenja. Od parazitskih opterećenja imamo napojnu pumpu, utisnu pumpu i potrošnje ACHE jedinica za odbacivanje topline.

$$P_{el,prag} = P_T - P_p - P_{p,utis} - P_{ACHE}$$

Snagu napojne pumpe smo već izračunali, snaga utisne pumpe je zadana, a snagu ACHE jedinica dobivamo iz modela koji u obzir uzima potrošnju snage za pogon ventilatora za ostvarivanje prisilne cirkulacije zraka kroz orebrene cijevi kroz koje prolazi sekundarna radna tvar, pri čemu se radna tvar hladi i kondenzira. Proračun ACHE jedinica je proveden preko zasebne funkcije koju pokreće glavna skripta, a proračun računa sljedeću funkciju:

$$P_{ACHE} = f(T_{ok}, T_k, q_{m,ORC}, N_{ACHE})$$

Detalji ove funkcije nisu dani u ovom radu, dan je samo grafički prikaz gornje funkcije za $N_{ACHE} = 10$.



Slika 6 ACHE dijagram

Vidljivo je da će potrošnja ventilatora u ACHE jedinici biti tim veća čim je veći maseni protok sekundarnog radnog fluida kojem treba oduzeti toplinski tok i čim je manja razlika temperatura između temperature kondenzacije i temperature okoliša (odbacivanje je bolje na većoj razlici temperatura jer traži manji protok zraka u cirkulaciji, a time i vrtnju ventilatora).

Ukupnu iskoristivost geotermalne elektrane, svedenu na jedinicu dovedene topline geotermalne vode računamo preko izraza:

$$\eta = \frac{P_{el,prag}}{\phi_{dov}}$$

I na kraju, potrebno je postaviti bilancu između bušotinskog fluida na proizvodnoj i utisnoj bušotini. Entalpija utisne bušotine je manja za iznos koji je preuzeo sekundarni fluid na glavnom izmjenjivaču, a uvećan za snagu utisne pumpe. Na taj način možemo odrediti koliko snage toplinskog toka ležište gubi:

$$\phi_R = \phi_{IW} - \phi_{PW} = -(\phi_{zag} + \phi_{isp} + \phi_{pr}) + P_{utis} < 0$$

Ležište gubi toplinsku snagu jer je utisnuti fluid na nižem termodinamičkom (entalpijskom) potencijalu u odnosu na proizvedeni. Proces proizvodnje snage u geotermalnoj elektrani je obnovljiv i održiv ako ležište uspije nadoknaditi izgubljeni toplinski tok u samom ležištu.

4. Analiza rezultata

U skripti smo koristili ulazne podatke date u tablici 2. koje smo osnovali na stvarnom primjeru geotermalne elektrane. Kao sekundarni medij koristili smo izobutan

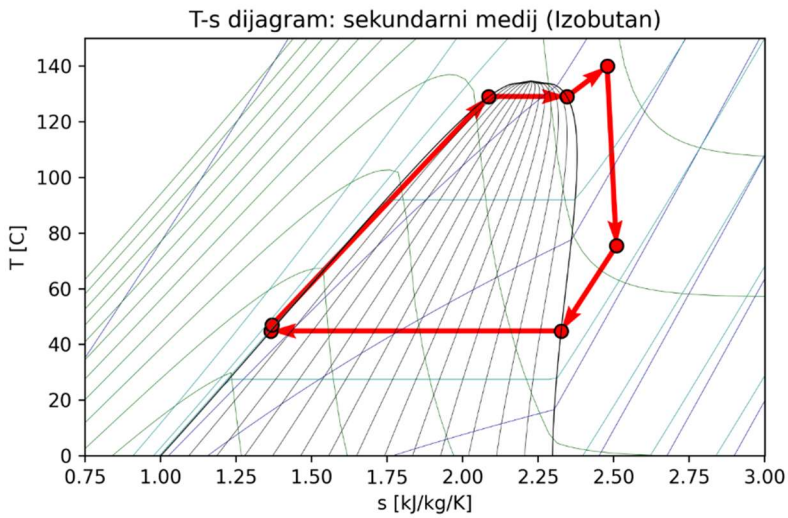
Izobutan		
p_{crit}	36,2 bar	Kritičan tlak
T_{crit}	134° C	Kritična temperatura
p_{isp}	33 bar	Tlak isparavanja
p_{kond}	6 bar	Tlak kondenzacije
T_{isp}	130°C	Temperatura ispravanja
ΔT_{kond}	24,85°C	Razlika između temperature okoliša i temperatura kondenzacije
T_{max}	140°C	Temperatura nakon pregrijavanja
Geotermalna voda		
$T_{w\text{-}in}$	170°C	Ulazna temperatura voda na ulazu u HEX (iz proizvodne bušotine)
$T_{w\text{-}out\text{-}min}$	70°C	Minimalna dozvoljena temperatura vode na izlazu iz HEX (prema utisnoj bušotini)
$q_{v,w}$	120 L/s	Volumni protok vode
ρ_w	950 kg/m^3	Gustoća vode
c_w	4180 kg/m^3	Specifični toplinski kapacitet vode
Parametri okoliša		
T_{ok}	20°C	Temperatura okolišnog zraka

ρ_{ok}	1 kg/m^3	Gustoća okolišnog zraka
Parametri elemenata sustava		
η_p	0,8	Izentropska iskoristivost utisne i napojne pumpe
ΔT_{min}	5°C	C minimalna temperaturna razlika u hex i kondenzatoru
N_{ACHE}	10	Broj ACHE jedinica
$q_{v, air, in}$	m3/h	Volumni protok zraka
P_{utis}	1000kW	Potrošnja utisne pumpe

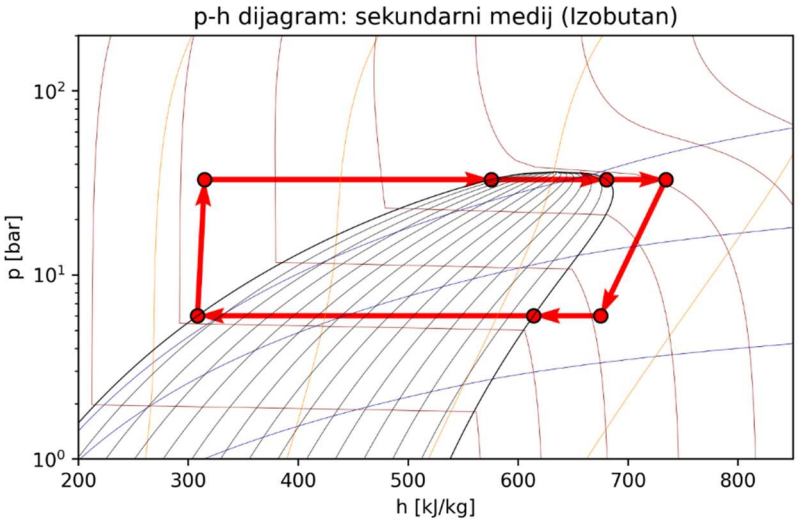
Tablica 2 Ulazni parametri

Koristeći ove podatke dobili smo p-H i T-s dijagram sekudarnog medija (izobutana), te dijagram energetskih tokova.

Slikama 7 i 8 prikazan je tipičan Rankineov ciklus u T-s (temperatura-entropija) i p – h (tlak-entalpija) dijagramu. Sekundarni medij, u ovom slučaju Izobutan, pregrijava se na temperaturu 140°C (tlak 33 bar) te takav ulazi u turbine. U turbinama gubi dio energije, te ulazi u proces kondenzacije. Temperatura izobutana pada na 44,58°C(tlak 6 bar). Zatim prolazi kroz pumpu te mu se podiže tlak. Nakon toga ulazi u izmjenjivač topline. Prvo se zagrijava dok ne dosegne temperaturu 130°C. Na toj temperaturi izobutan isparava sve dok potpuno ne ispari. Slijedi ponovno pregrijavanje.

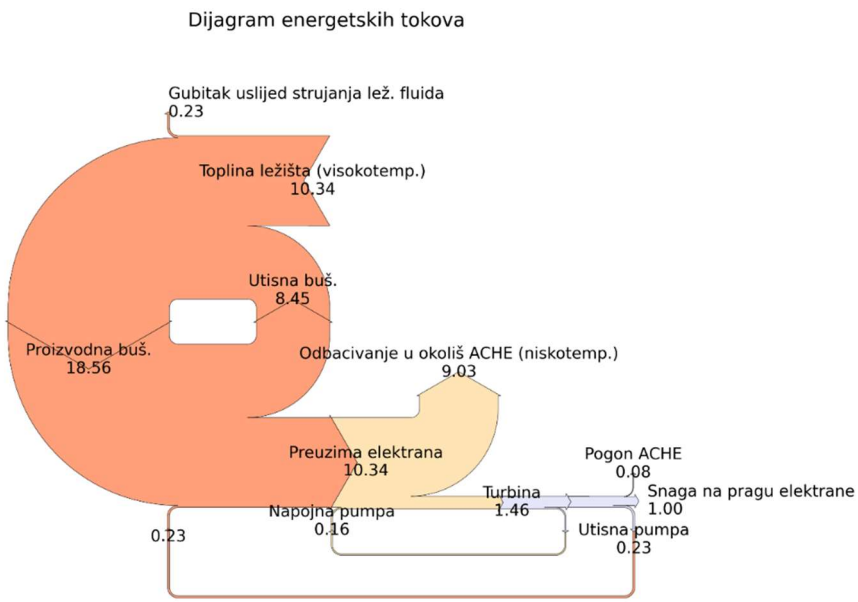


Slika 7 T-s dijagram zadanog oganskog Rankineovog ciklusa



Slika 8 p-h dijagram zadanog organskog Rankineovog ciklulsa

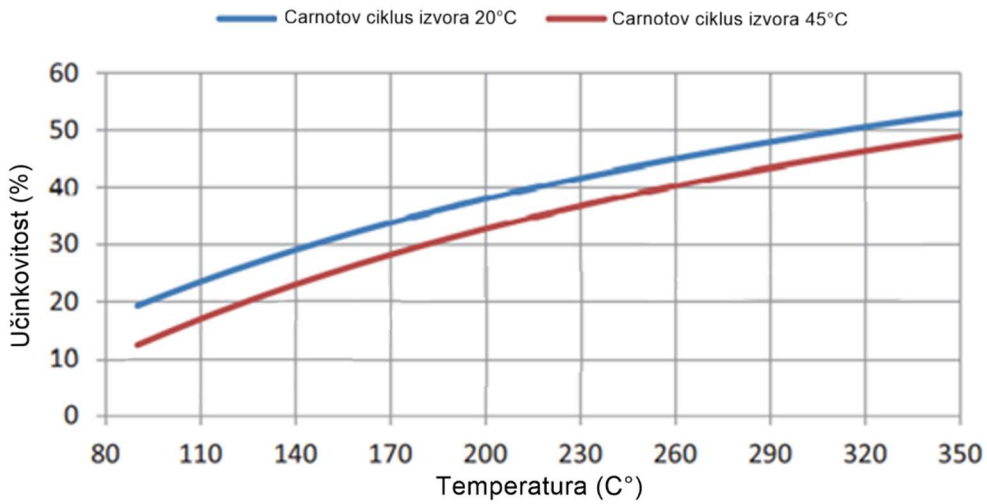
Također, ova skripta nam omogućava generiranje dijagrama energetskih tokova. Njime je prikazana vizualizacija kretanja energije i na što se ona "troši" i otpada. Od ukupne toplinske energije koju je elektrana u potpunosti preuzela iz ležišta, samo oko 14% uspije preuzeti turbina. Najviše preuzmu ACHE jedinice, odnosno najveća je potrošnja ventilatora. Osim ventilatora potrošnju ima i napojna pumpa, no mnogo manju.



Slika 9 Dijagram energetskih tokova

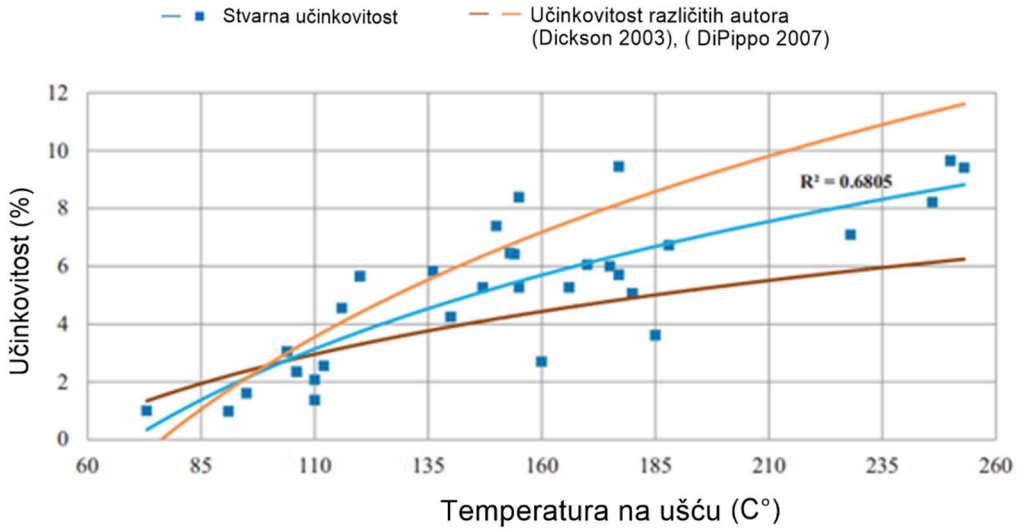
4.1. Rezultati iz literatura

Između primarnog i sekundarnog fluida dolazi do predaje topline Cartonovim ciklusom. Carnotov ciklus je idealni zatvoreni ciklusi. Povratljiv je i nema gubitaka. Stoga nema promjene u temperaturi između topline ušća i radnog fluida. Zarrouk i Moon (2013.) su definirali da učinkovitost Cartonovog ciklusa izravno ovisi o temperaturi primarnog i sekundarnog medija. Na slici 10. je prikazana jednostavna usporedba učinkovitosti dva različita Cartonova ciklusa. U prvom ciklusi temperatura primarnog fluida je 20°C, a u drugom ona iznosi 45°C. Možemo zaključiti da je učinkovitost veća što je razlika između primarnog i sekundarnog fluida manja.



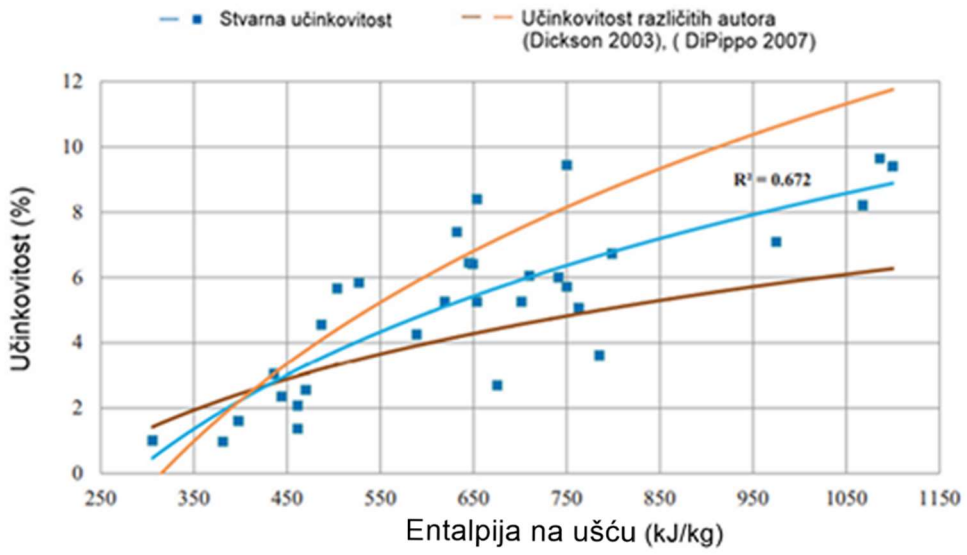
Slika 10 Ovisnost učinkovitosti Cartonovog i trokutastog ciklusa o temperaturi radnog fluida (Zarrouk & Moon 2013)

Na sljedećoj slici, slici 11., dali su prikaz stvarne učinkovitosti geotermalnih elektrana te kako one ovise o temperaturi primarnog fluida, te njenu formulu (R^2 = 0,6805).



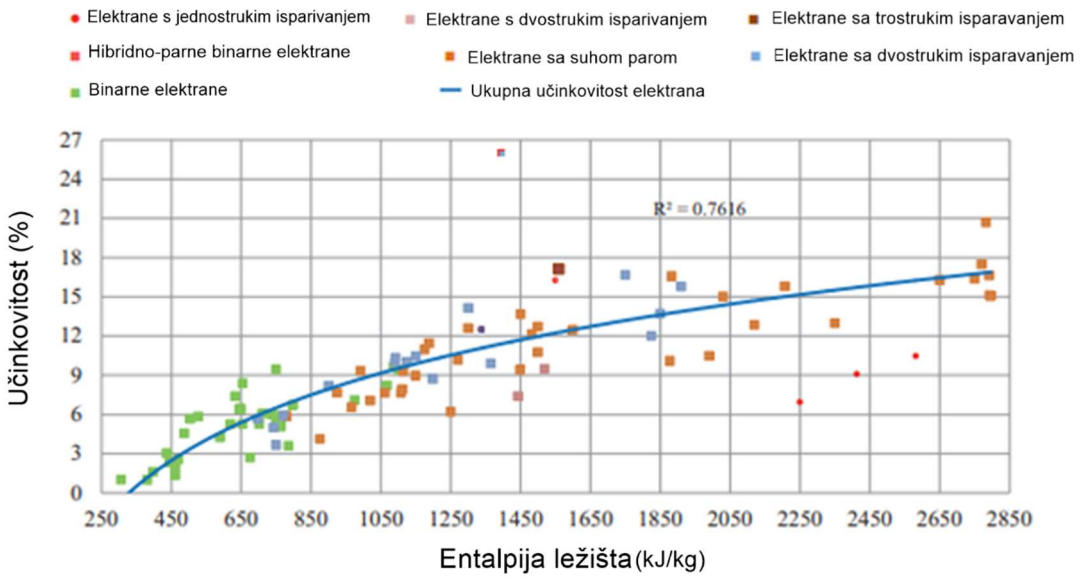
Slika 11 Ovisnost učinkovitosti o temperaturi primarnog fluida na ušću (Zarrouk & Moon 2013)

Na slici 12. prikazali su istu ovisnost, no u odnosu učinkovitost – entalpija. Jasno je vidljivo da što je veća temperatura, odnosno entalpija primarnog fluida na ušću to je veća učinkovitost cijele elektrane.



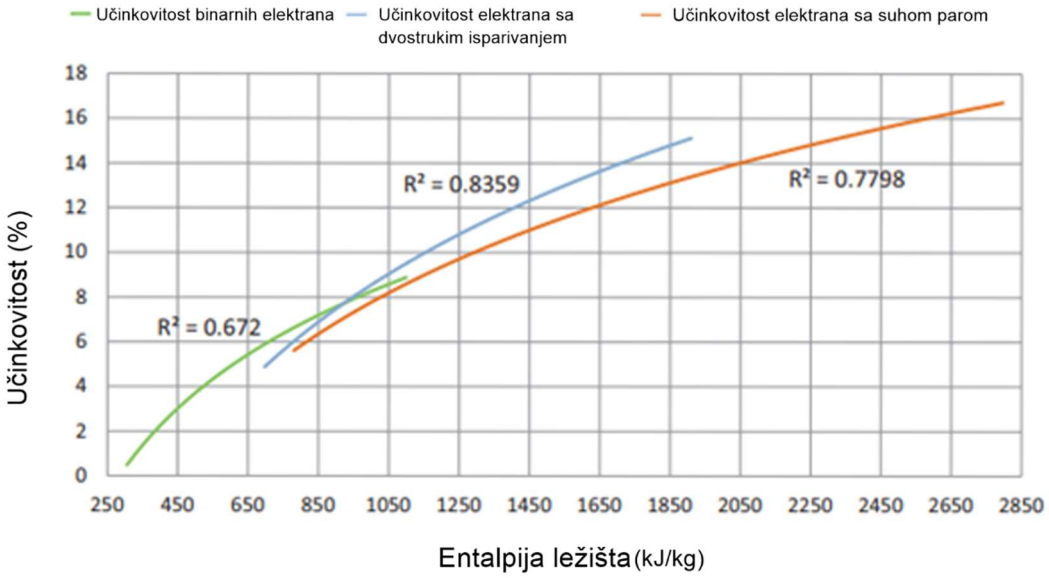
Slika 12 Ovisnost učinkovitosti o entalpiji primarnog fluida na ušću (Zarrouk & Moon 2013)

Na slici 13. prikazali su zaključnu učinkovitost svih vrsta elektrana. Podaci na slici 9. također prikazuju prosječnu svjetsku učinkovitost geotermalnih elektrana od 12%.



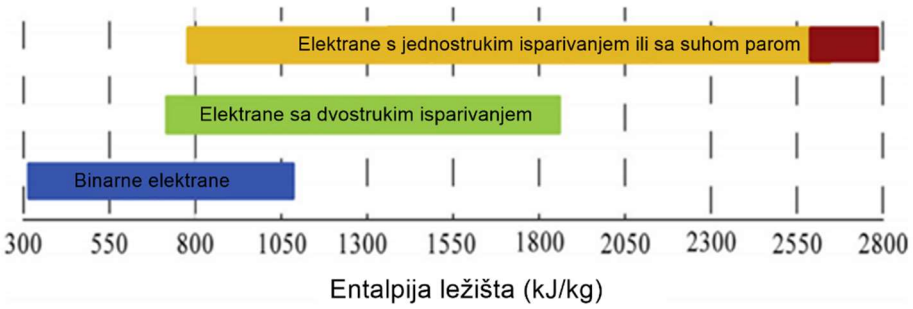
Slika 13 Ovisnost učinkovitosti o entalpiji ležišta (Zarrouk & Moon 2013)

Sažetak prikaza učinkovitosti za različite tipove geotermalnih elektrana prikazan je slikom 14. Jasno je vidljivo da postrojenja koja izravno koriste primarni medij (ležišni fluid) imaju veću učinkovitost za veće raspone entalpije. Međutim kod ležišta nižih entalpija, bolje su se pokazale one koje koriste sekundarni radni medij, odnosno binarne elektrane.



Slika 14 Učinkovitosti različitih vrsta geotermalnih postrojenja i ovisnosti o entalpiji ležišta (Zarrouk & Moon 2013)

Binarne elektrane mogu proizvesti električnu energiju iz ležišnog fluida niskih entalpija od čak 306 kJ/kg sve do 1100 kJ/kg. Generacija iz veće entalpije je također moguća, no za entalpiju veću od 1900 kJ/kg preporuča se korištenje postrojenja sa suhom parom ili jednostrukim isparivanjem.



Slika 15 Područje rada elektrana za različite entalpije ležišta (Zarrouk & Moon 2013)

Bitno je napomenuti da binarna postrojenja imaju veću pogrešku pri izračunu učinkovitosti od drugih vrsta postrojenja. Za obaranje topline koriste zračno hlađenje na koje snažno utječu vremenske prilike i stanje okoline. Ti se uvjeti razlikuju od mjesta do mjesta i sezonski ovise o dobu godine.

Prosječni faktor kapaciteta postrojenja u cijelom svijetu : ovo je omjer stvarne izlazne snage elektrane i njezine potencijalne izlaze snage u idealnim uvjetima te ako radi punim (projektnim) kapacitetom, a za binarna postrojenja iznosi 92.7% . (Zarrouk & Moon 2013)

5. Zaključak

Osnovni princip rada binarnih elektrana temelji se na prijenosu topline sa ležišnog fluida u izmjenjivaču topline na sekundarni radni fluid, čija je temperatura isparavanja niža od 100 °C. Radni fluid u izmjenjivaču topline prelazi u paru. Zatim putuje do turbina gdje pokreće generator u svrhu proizvodnje energije. Slijedi proces hlađenja kondenzatorima. Sekundarni radni medij tada, u kapljevitom stanju, prolazi napojnom pumpom koja ga prosljeđuje izmjenjivaču topline, a taj proces se ponavlja.

Možemo donijeti nekoliko osnovnih zaključaka koji se tiču binarnih elektrana. One su se pokazale kao najbolje tehnološko rješenje za ležišta čija temperatura ne premašuje 200 °C. U tom temperaturnom području imaju veću učinkovitost od elektrana s izravnom ekspanzijom suhe pare i s jednostrukim ili višestrukim isparivanjima.

Postoji više faktora koji utječu na ukupnu učinkovitost geotermalne elektrane kao što su to: gubitak topline od opreme, učinkovitost generatora, učinkovitost turbine i dijelovi elektrane koji sami troše energiju za rad. No, na učinkovitost elektrane najveći utjecaj ima temperatura samog ležišta. Naravno, što je veća temperatura, veća je i toplinska energija koju ležišni fluid na ušću predaje sekundarnom radnom mediju, te elektrana tada proizvodi više električne energije.

Najveći potrošač energije u elektrani jest kondenzator. Na hlađenje ventilatorima otpada gotovo 87% energije preuzete iz ležišta. Na to utječu i vremenske prilike te temperatura okoliša, pa je tijekom hladnijeg doba godine taj postotak nešto manji. Kada bismo zamijenili rashladni toranj "suhog" tipa za onaj "mokrog" tipa uštedili bi pola energije potrebne za hlađenje.

6. Literatura

BELL I.H., WRONSKI J., QUOILIN S., LEMORT V., 2014. Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library Cool Prop. Industrial & Engineering Chemistry Research

JUNG H.C., KRUMDIECK S., 2012. Modelling of organic Rankine cycle system and heat exchanger components. Novi Zeland: Taylor&Francis

UIHLEIN A., 2018. JRC Geothermal Power Plant Dataset. European Commission, Joint Research Centre (JRC)
URL: https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/jrc-10128-10001

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2021. Geothermal energy explained: Use of geothermal energy (26.5.2021.)
URL: https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/use-of-geothermal-energy.php

ZARROUK S.J., MOON H., 2013. Efficiency of geothermal power plants: A world wide review. Novi Zeland: Elsevier

2021. Geothermal energy: Information an facts. National Geographic (26.5.2021.)
URL: https://www.nationalgeographic.com/environment/article/geothermal-energy

KLASA: 602-04/21-01/76
URBROJ: 251-70-11-21-2
U Zagrebu, 13.09.2021.

Marija Helena Petrović, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/76, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 28.04.2021. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

KORIŠTENJE GEOTERMALNE ENERGIJE ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za voditelja ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc. dr. sc. Luka Perković nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Luka Perković

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor Kuhinek

(titula, ime i prezime)