

Termodinamički ORC proces za iskorištavanje geotermalne energije

Cirimotić, David

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:632670>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

David Cirimotić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

David Cirimotić

TERMODINAMIČKI ORC PROCES ZA ISKORIŠTAVANJE GEOTERMALNE
ENERGIJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Veljko Filipan

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof. dr. sc. Veljko Filipan

prof. dr. sc. Igor Sutlović

izv. prof. dr. sc. Vladimir Dananić

prof. dr. sc. Emi Govorčin Bajsić, zamjena

Zagreb, rujan 2021.

SAŽETAK

Svrha ovog rada je opisati dobivanje električne energije iz geotermalnih izvora topline s naglaskom na organski Rankineov ciklus. Ovaj rad daje odgovore na pitanja odakle Zemlji toplinska energija te koji geološki procesi utječu na to zašto je geotermalni potencijal nekih geografskih regija veći u odnosu na druge geografske regije. Također je priložen status iskorištavanja geotermalne energije za dobivanje električne energije u svijetu i Republici Hrvatskoj. Priložen je opis vrsta geotermalnih elektrana i pobliže je proučeno binarno postrojenje s ORC-om te koji se sve zahtjevi moraju ispuniti kako bi se jedno takvo postrojenje moglo ostvariti. Završni rad uključuje termodinamičku, ekološku i sigurnosnu analizu organskih radnih medija u dva slučaja. Prvi slučaj se odnosi na promjenu maksimalnog tlaka u ORC-u pri konstantnoj maksimalnoj temperaturi, pri čemu je uočeno kako pregrijavanje suhih i izentropskih radnih medija nije potrebno. Drugi slučaj se bavi promjenom maksimalne temperature u ORC-u pri konstantnom maksimalnom tlaku, gdje se uočava porast neto rada, ali ne dolazi do bitnije promjene termodinamičkog stupnja iskorištenja.

Ključne riječi: geotermalna energija, termodinamika, ORC

ABSTRACT

The purpose of this paper is to describe the production of electricity from geothermal heat sources with emphasis on the organic Rankine cycle. This paper provides answers to the questions of where the Earth gets its heat energy from, and which geological processes affect why the geothermal potential of some geographical regions is higher compared to others. The status of the use of geothermal energy for obtaining electricity in the world and in the Republic of Croatia is also attached. A description of the types of geothermal power plants is given and the binary plant with ORC is studied in more detail and what all requirements must be met in order for such a plant to be realized. The final work includes thermodynamic, ecological and safety analysis of organic working fluids in two cases. The first case concerns the change of the maximum pressure in the ORC at a constant maximum temperature, where it was observed that overheating of dry and isentropic working media is not necessary. The second case deals with the change of the maximum temperature in the ORC at a constant maximum pressure, where an increase in net work is observed, but there is no significant change in the thermodynamic efficiency.

Key words: geothermal energy, thermodynamics, ORC

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Veljku Filipanu na pomoći, uputama i savjetima koje mi je pružio tijekom pisanja Završnog rada.

Zahvaljujem gospodinu Zlatku Kuntiću na pomoći, savjetima i što mi je pokazao kako radi GTE Velika 1.

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. OPĆI DIO	2
2.1. Općenito o geotermalnoj energiji	2
2.2. Geotermalni gradijent i toplinski tok Zemlje	3
2.3. Geotermalni sustavi	4
2.3.1. Podjela hidrotermalnih sustava prema temperaturi geotermalnog fluida	4
2.3.2. Podjela hidrotermalnih sustava prema stanju geotermalnog fluida	5
2.4. Kemijski sastav geotermalnog fluida	5
2.5. Pojava korozije i kamenca	5
2.6. Geotermalna energija u svijetu	6
2.7. Geotermalna energija u Republici Hrvatskoj	7
2.8. Geotermalne elektrane	8
2.8.1. Postrojenja sa suhom parom	9
2.8.2. Postrojenja s isparavanjem geotermalnog fluida	10
2.8.3. Binarna postrojenja	12
3. PREGLEDNI DIO	13
3.1. Organski Rankineov ciklus	13
3.2. Proračun i shema osnovne opreme za ORC	14
3.2.1. Ekspanzijski strojevi	14
3.2.1.1. Turbina	15
3.2.2. Izmjenjivači topline	15
3.2.2.1. Zagrijači i isparivači	15
3.2.2.2. Kondenzator	16
3.2.2.3. Rekuperator	18
3.2.3. Pumpa	18
3.3. Radni mediji	19
3.3.1. Klasifikacija radnih medija prema obliku krivulje	19
3.3.2. Klasifikacija organskih radnih medija s obzirom na kemijski sastav	20
3.3.3. Usporedba organskih radnih medija i vode	20

3.3.4. Radni mediji za ORC	21
3.4. Ekološki aspekti iskorištavanja geotermalne energije	22
3.4.1. Fizički utjecaji vađenja geotermalnog fluida	22
3.4.2. Toplinski učinci	22
3.4.3. Kemijsko onečišćenje	23
3.4.4. Biološki učinci	23
3.4.5. Buka	23
3.5. Geotermalna elektrana Velika 1	23
3.6. Usporedba radnih medija u ORC-u	26
3.6.1. Usporedba procesa za konstantnu maksimalnu temperaturu	27
3.6.2. Usporedba procesa za konstantan maksimalan tlak	28
4. REZULTAT I RASPRAVA	30
4.1. Sigurnosna i ekološka usporedba organskih radnih medija	30
4.2. Termodinamička usporedba organskih radnih medija	30
4.2.1. Usporedba za $T_{\max} = \text{konst.}$	30
4.2.2. Usporedba za $p_{\max} = \text{konst.}$	32
5. ZAKLJUČAK	35
6. POPIS SIMBOLA KORIŠTENIH U RADU	36
7. LITERATURA	38
8. PRILOZI	40

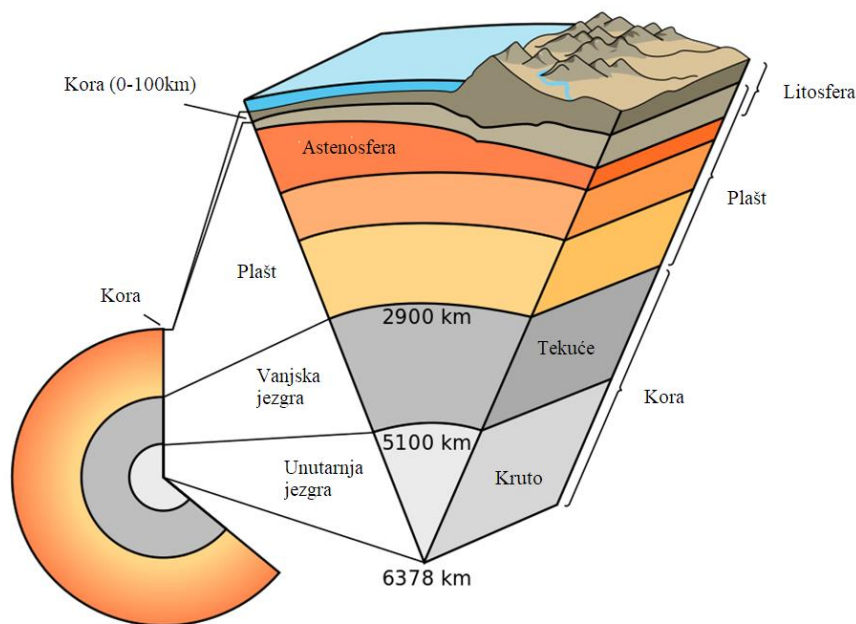
1. UVOD

Geotermalna energija je sva toplinska energija koja se nalazi ispod Zemljine površine te se emitira prema površini Zemlje, a do najvećeg izražaja dolazi uz granice tektonskih ploča. Ekonomski isplativo mogu se upotrebljavati hidrotermalni izvori koji su se u davnoj prošlosti iskorištavali samo za kupališta i lječilišta, no razvojem tehnologije se ovakav oblik energije iskorištava i za dobivanje električne energije. Postoji nekoliko vrsta geotermalnih elektrana (postrojenja sa suhom parom, postrojenja s isparavanjem i binarna postrojenja), s time da se za niskotemperaturne i srednjetemperaturne geotermalne fluide koristi binarno postrojenje sa organskim Rankineovim ciklusom. Srž takvog postrojenja je organski radni medij koji mora biti pomno odabran s obzirom na karakteristike geotermalnog fluida, termodinamičke karakteristike radnog medija u procesu i s obzirom na sigurnost i ekologiju. Nakon odabira pogodnog organskog radnog medija projektira se cijela elektrana. Važnost iskorištavanja geotermalne energije iz godine u godinu raste što se vidi na kontinuiranom rastu instalirane snage geotermalnih elektrana u svijetu. U Republici Hrvatskoj je u pogonu samo jedna geotermalna elektrana koja radi sa ORC-om, a potencijal za iskorištavanjem geotermalne elektrane u električne svrhe je puno veći.

2. OPĆI DIO

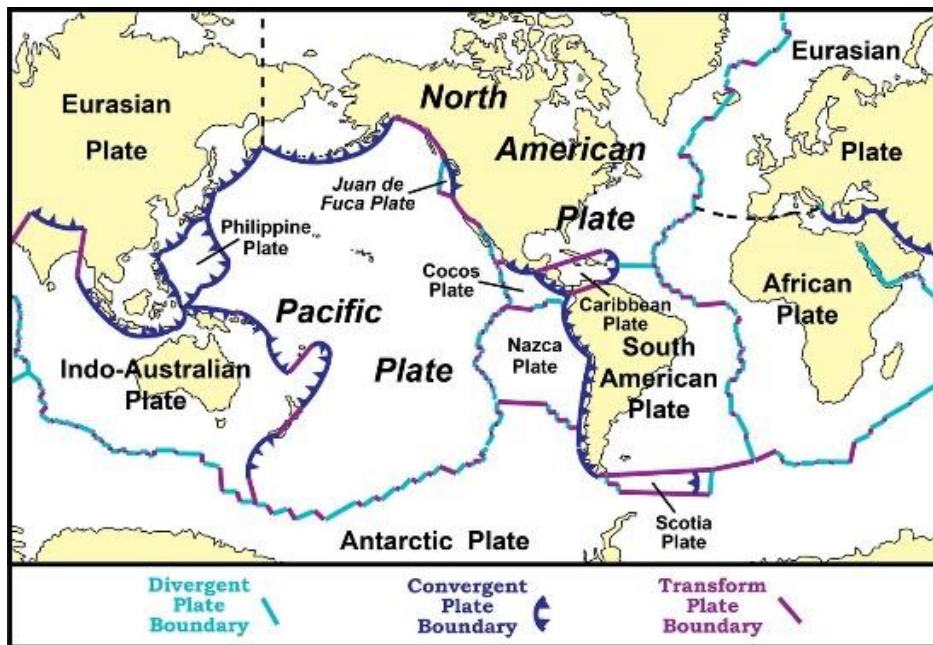
2.1. Općenito o geotermalnoj energiji

Pod pojmom geotermalne energije smatra se sva ona energija sadržana ispod površine Zemlje. Naravno, ta energija nije jednoliko raspoređena po dubini na kojoj se nalazi niti po površini Zemlje. Unutrašnjost Zemlje dijeli se na koru, plašt i jezgru, od kojih je kora najplići dio, jezgra najdublji dio, a plašt je smješten između kore i jezgre. Zemljina kora dijeli se na oceansku i kontinentalnu koru, plašt na gornji, prijelazni i donji dio plašta, a jezgra na vanjsku i unutrašnju jezgru. Ovakva podjela Zemljine unutrašnjosti se odnosi na sastav pojedinog sloja i dosta je gruba da bi se pojasnilo zašto su određene geografske regije pogodnije za iskorištavanje geotermalne energije. Tu uskače podjela unutrašnjosti Zemlje prema mehaničkim svojstvima pojedinog sloja, od kojih su za teoriju tektonskih ploča najbitnija gornja dva mehanička sloja. To su kruta litosfera koja obuhvaća koru i gornji dio plašta i astenosfera koja se sastoji od prijelaznog i donjeg dijela plašta te se nalazi na puno višim temperaturama od litosfere te se lakše deformira jer je djelomično rastaljena.



Slika 1. Slojevi Zemlje [1]

Prema teoriji tektonskih ploča, litosfera nije cjelovita ljuska, već je razlomljena na nekoliko litosfernih (tektonskih) ploča različitih dimenzija koje klize po astenosferi, relativno jedna ploča prema drugoj. Ploče se mogu udaljavati jedna od druge, sabijati ili smicati jedna uz drugu, a rezultat njihovog gibanja su granice tektonskih ploča. One mogu biti konvergentne, divergentne ili transformirani rasjedi (slika 2). [2,3]



Slika 2. Granice tektonskih ploča [4]

Ukoliko je granica konvergentna, onda dolazi do sabijanja jedne ploče o drugu te može doći do nastajanja planinskih lanaca poput Himalaje ili do podvlačenja jedne ploče pod drugu. Podvlačenje se najčešće događa kada se sudaraju oceanska kora jedne ploče i kontinentalna kora druge ploče. Oceanska kora je gušća od kontinentalne kore stoga se ona podvlači pod kontinentalnu koru. Pri tome, materijal podvlaćeće ploče prodire u astenosferu koja ga konzumira. Podvlačenje ploča omogućuje magmi da iz astenosfere prodre u litosferu kroz razne pukotine. Na taj se način litosfera više grije uz konvergentnu granicu, a cijela granica je obilježena vulkanskom i seizmičkom aktivnošću. Najpoznatiji primjer konvergentne granice je Pacifički vatreni obruč.

Količina energije sadržana u unutrašnjosti Zemlje je toliko velika da se zbog toga geotermalna energija smatra obnovljivim i održivim oblikom energije. Dva su glavna izvora geotermalne energije, a to su toplina koja potječe od nastanka planeta Zemlje i toplina koja se oslobađa raspadom radioaktivnih izotopa. Potonji su izotopi uranija (^{238}U i ^{235}U) i torij (^{232}Th) koji alfa raspadom završavaju kao olovo (Pb) te kalijevi izotopi (^{39}K , ^{40}K i ^{41}K) od kojih je najradioaktivniji ^{40}K koji oslobađa energiju beta raspadom. Radioaktivni materijal se nalazi pretežito u kontinentalnoj kori gdje doprinosi oko 60% topline. Reakcije raspada radioaktivnih izotopa: [3]



2.2. Geotermalni gradijent i toplinski tok Zemlje

Kako bi se geotermalna energija mogla iskoristavati potrebno je pronaći lokaciju s povoljnim geotermalnim gradijentom. Geotermalni gradijent je veličina koja govori koliko raste

temperatura Zemlje s dubinom, te mu je mjerna jedinica °C/m, °C/100m ili °C/km. Prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta je 0,03°C/m. Osim geotermalnog gradijenta, važan je i toplinski tok koji govori o toplini koja dolazi iz središta Zemlje, mjerna jedinica je mW/m². Toplinski tok u prosjeku iznosi 101 mW/m² za oceansku koru, a za kontinentalnu koru 65 mW/m². [2,3]

2.3. Geotermalni sustavi

Četiri su vrste geotermalnih sustava:

- 1) hidrotermalni sustavi
- 2) tople suhe stijene (HDR)
- 3) geotlačni sustavi
- 4) magma

Trenutno se samo hidrotermalna ležišta mogu ekonomično iskorištavati. Hidrotermalna ležišta dijele se s obzirom na temperaturu i s obzirom na stanje geotermalnog fluida. Postoji pet karakteristika koje su bitne da bi hidrotermalni geotermalni izvor bio komercijalno isplativ. Treba postojati:

- 1) veliki toplinski izvor
- 2) propustan spremnik
- 3) dovod vode
- 4) pokrovni sloj od nepropusne stijene
- 5) pouzdan mehanizam obnavljanja geotermalnog fluida [5]

2.3.1. Podjela hidrotermalnih sustava prema temperaturi geotermalnog fluida

S obzirom na temperaturu dijele se na visokotemperaturna ležišta, srednjetemperaturna ležišta i na niskotemperaturna ležišta prema Bendorferu i Cornyju. Visokotemperaturna ležišta sadrže temperaturu geotermalnog fluida preko 200°C, srednjetemperaturna ležišta su između 200°C i 100°C, a niskotemperaturna ležišta imaju temperature manje od 100°C. [2]

U svrhu proizvodnje električne energije upotrebljavaju se visokotemperaturna i srednjetemperaturna ležišta iako postoji potencijal da se i niskotemperaturna ležišta iskoriste u tu svrhu. Tradicionalno se niskotemperaturna ležišta upotrebljavaju u neelektrične svrhe, odnosno u agronomiji za grijanje plastenika, za grijanje stambenih prostora, u drvnoj industriji i industriji papira za sušenje, za potrebe lječilišta i kupališta.

2.3.2. Podjela hidrotermalnih sustava prema stanju geotermalnog fluida

S obzirom na stanje geotermalnog fluida, ležišta se dijele na ona u kojima dominira kapljevina i na one u kojima dominira para. Stanje geotermalnog fluida je određeno tlakom i temperaturom u rezervoaru, iako je temperatura vode preko temperature vrenja pri atmosferskom tlaku, u rezervoaru će zbog velikog tlaka, voda biti u kapljevitom stanju. Tamo gdje dominira kapljevina temperature su do 225°C, geotermalna voda je kapljevina ili mokra para s kapljevitom kontinuiranom fazom. Takvih rezervoara ima najviše. U sustavima gdje dominira para su temperature iznad 225°C, s time da je geotermalni fluid u pregrijanom području ili u mokrom u kojemu je para kontinuirana faza. [2,3,5,6]

2.4. Kemijski sastav geotermalnog fluida

Sastav geotermalnog fluida varira od ležišta do ležišta, ali generalno svaki geotermalni fluid sadržava slične otopljene komponente. U geotermalnom fluidu mogu biti otopljeni plinovi poput ugljikova dioksida (CO₂) čiji maseni udio u pari često iznosi do 90% pare, sumporovodik (H₂S), amonijak (NH₃), dušik (N₂), vodik (H₂) i metan (CH₄). Također mogu biti otopljene i brojne anorganske i organske nečistoće, primjerice Na, Cl, Ca, Si, B, As, S, Fe, Hg, Zn, Mn, teški metali i organske tvari u tragovima. [3,6]

2.5. Pojava korozije i kamenca

Zbog sastava geotermalnog fluida vrlo često može doći do pojave kamenca i korozije. Oni utječu na sam rad elektrane jer umanjuju njezinu ukupnu djelotvornost, a mogu čak uzrokovati i prekid rada elektrane.

Korozija se javlja zbog otopljenih tvari (prisutnost kiselina ili nagrizajućih plinova poput H₂S) u geotermalnom fluidu koji mogu oksidirati proizvodne i utisne pumpe, izmjenjivače topline i regulacijsku opremu. Način na koji se može umanjiti utjecaj korozije je dodavanjem inhibitora korozije.

Kamenac nastaje na cijevima kroz koje prolazi geotermalni fluid i pritom sužava njihov promjer te ih može u potpunosti začepiti. Kamenac može umanjiti djelotvornost izmjenjivača topline jer stvaranjem naslaga kamenca nastaje novi sloj koji čini dodatani otpor prijenosu topline. Do stvaranja kamenca dolazi zbog taloženja kalcijeva karbonata (CaCO₃), metalnih sulfata i silicijeva dioksida (SiO₂) koji su prisutni u gotovo svim hidrotermalnim ležištima.

Na taloženje CaCO₃ utječu temperatura, pH vrijednost, parcijalni tlak ugljikova dioksida (CO₂), salinitet i koncentracija kalcijeva iona (Ca²⁺). Kada se geotermalni fluid isparava dolazi do pada tlaka i do desorpcije CO₂ (i ostalih nekondenzirajućih plinova, NCG-ova (engl. „non-condensable gases“)) što prema ravnoteži utječe na pad kiselosti (povećanje pH vrijednosti) i povećano formiranje krutog CaCO₃. [3,6]



Na taloženje SiO₂ može doći u nekoliko strukturnih oblika i zajednički svima njima je da im topljivost raste rastom temperature. Kvarc kontrolira topljivost u rezervoaru (veća temperatura

geotermalnog fluida), dok amorfni silicijev dioksid kontrolira topljivost nakon što geotermalni fluid preda toplinu, tj. pri nižim temperaturama geotermalnog fluida. Topljivost SiO_2 ovisi o temperaturi, salinitetu i pH. Što je veći salinitet to je manja topljivost kvarca i amornog silicijeva dioksida. U kiselom području se topljivost amornog silicijeva dioksida gotovo i ne mijenja, dok naglo kreće rasti kada je pH veći od 7 (lužnato područje).

Jedan način da se spriječi taloženje kamenca je korištenjem inhibitora kamenca, a drugi je da se tlak u cijevima i opremi kroz koju struji geotermalni fluid drži na dovoljno visokom tlaku kako ne bi došlo do isparavanja geotermalnog fluida i desorpcije NCG-a te posljedično stvaranja kamenca zbog smanjene topljivosti CaCO_3 i povećane koncentracije SiO_2 u kapljevitoj fazi. Zbog toga je veća opasnost od nastajanja kamenca kod postrojenja s isparavanjem nego kod binarnih postrojenja jer kod binarnih postrojenja geotermalnom fluidu opada temperatura bez promjene faze i ona je jedini faktor koji utječe na stvaranje kamenca.

2.6. Geotermalna energija u svijetu

Geotermalne elektrane su rasprostranjene svuda po svijetu. Najviše instaliranih geotermalnih postrojenja je uz Pacifički vatreni prsten (Južna i Jugoistočna Azija i zapad Sjeverne i Južne Amerike). Države koje prednjače prema instaliranoj snazi u 2020. godini su: [7]

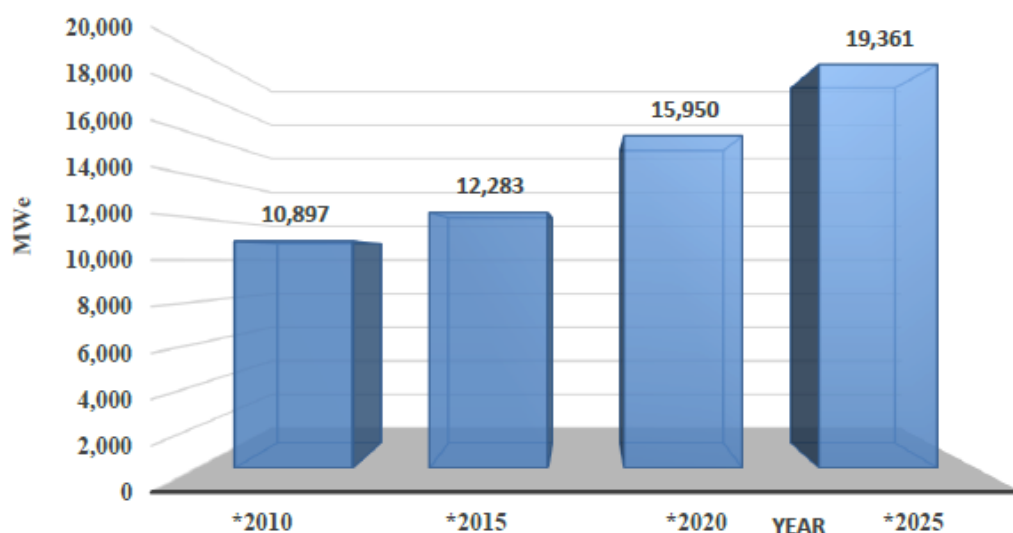
- 1) Sjedinjene Američke Države – 3700 MWe
- 2) Indonezija – 2289 MWe
- 3) Filipini – 1918 MWe
- 4) Turska – 1549 MWe
- 5) Kenija – 1193 MWe



Slika 3. Rasprostranjenost geotermalnih postrojenja u svijetu [8]

Prema podacima koje prilaže autor G.W. Huttner [7], od 2015. do 2020. godine je izbušeno 1159 bušotina unutar projekata za električno iskorištavanje geotermalne energije te je u tom istom razdoblju utrošeno 10 367 milijuna američkih dolara za razvoj projekata. Također, pet je država koje su počele proizvoditi električnu struju iz geotermalnih izvora po prvi puta. To su Čile (48 MWe), Honduras (35 MWe), Hrvatska (16,5 MWe), Mađarska (3 MWe) i Belgija (0,8 MWe).

Proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora raste zadnjih desetak godina. Stopa rasta instalirane snage je bila visokih 27,70% do 2020. godine, a projekcija za 2025. godinu predviđa pad stope rasta na 19,00%. Također se predviđa da će do 2025. godine biti instalirano 19 361 MWe u svijetu.



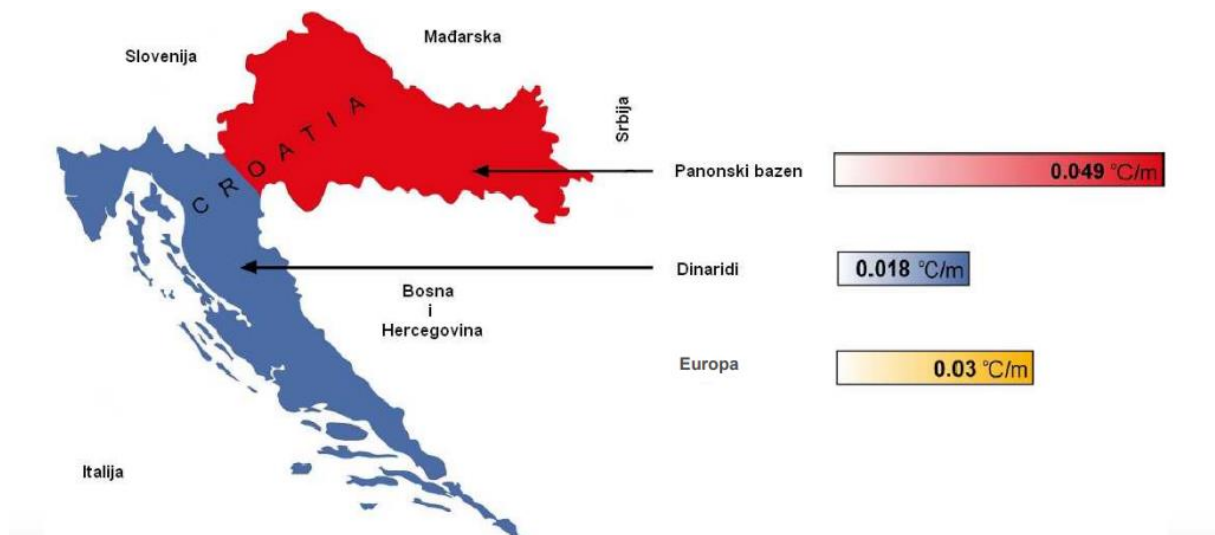
Slika 4. Stvarno instalirana snaga geotermalnih elektrana od 2010. do 2020. godine i projekcija do 2025. godine [7]

2.7. Geotermalna energija u Republici Hrvatskoj

Republika Hrvatska se nalazi relativno blizu konvergentne granice euroazijske i afričke tektonske ploče. Zbog toga geotermalnih izvora ima širom Republike Hrvatske, a dijele se na tri veće regije. To su panonsko područje, područje središnje Hrvatske i Dinaridi od kojih najveći geotermalni potencijal ima panonsko područje. Panonsko područje obuhvaća Posavinu, Podravinu i Slavoniju, područje središnje Hrvatske obuhvaća prostor od Međimurja do Korduna i Banovine, a u područje Dinarida spadaju područja uz jadransku obalu. Prosječna vrijednost geotermalnog gradijenta panonske regije iznosi $0,049^{\circ}\text{C}/\text{m}$, što je više od europskog prosjeka ($0,03^{\circ}\text{C}/\text{m}$), uz toplinski tok od $76 \text{ mW}/\text{m}^2$. S druge strane, regija Dinarida ima najniži geotermalni potencijal s prosječnom vrijednosti geotermalnog gradijenta od $0,018^{\circ}\text{C}/\text{m}$ i toplinskim tokom $29 \text{ mW}/\text{m}^2$. Geotermalna energija u našoj domovini se najviše iskorištava u neelektrične svrhe. U Republici Hrvatskoj se nalazi 10 geotermalnih polja, a to su geotermalna

polja Zagreb, Bizovac, Ernestinovo, Lunjkovec-Kutnjak, Ferdinandovac, Velika Ciglena, Mandarinci, Rečica, Babina Greda i Topusko. Najvažnija ležišta su ona s najvećom temperaturom geotermalnog fluida: [9-12]

- 1) Molve – 180°C
- 2) Velika Ciglena – 170°C
- 3) Patkovac – 150°C
- 4) Lunjkovec – Kutnjak – 140°C
- 5) Benićanci – 123°C



Slika 5. Geotermalne regije u Republici Hrvatskoj [13]

2.8. Geotermalne elektrane

Geotermalne elektrane su postrojenja koja služe za iskorištavanje geotermalne energije za dobivanje električne struje. Vrstu geotermalne elektrane određuje termodinamičko stanje geotermalnog fluida, a dijele se na tri osnovna tipa postrojenja:

- 1) postrojenja sa suhom parom
- 2) postrojenja s isparavanjem geotermalnog fluida (jednostruko, dvostruko ili trostruko)
- 3) binarna postrojenja (ORC, Kalina)

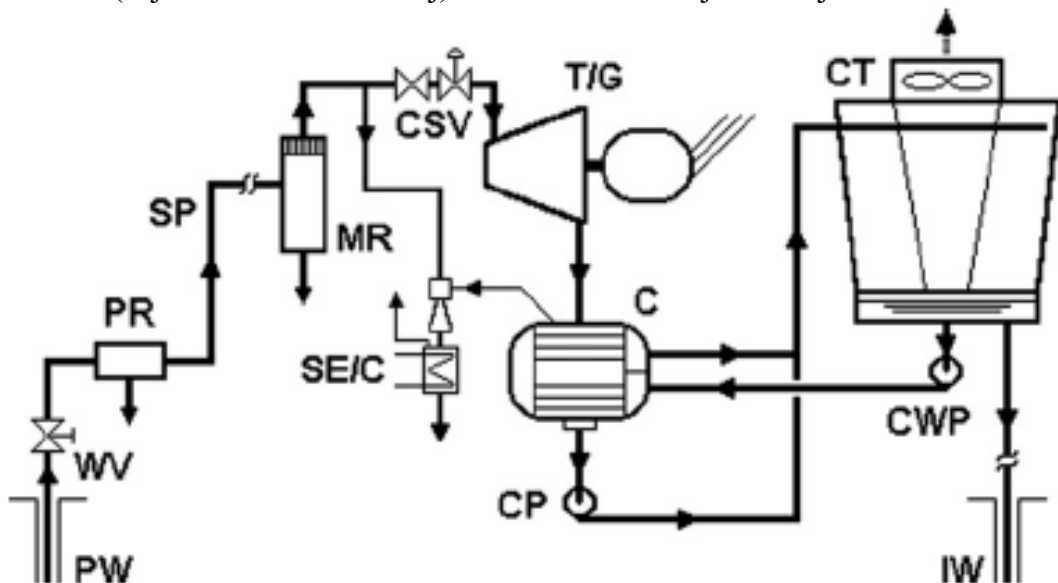
Važno je naglasiti kako postoje napredne geotermalne elektrane koje su u stvari hibridna postrojenja s isparavanjem ili binarnim postrojenjima, CHP postrojenja, postrojenja s isparavanjem koja koriste postrojenja na fosilna goriva za pregrijavanje pare, solarno-geotermalna hibridna postrojenja i mnoge druge kombinacije.

2.8.1. Postrojenja sa suhom parom

Postrojenja sa suhom parom nisu česta jer je za njih potrebno da geotermalni fluid u ležištu bude u stanju suhe ili pregrijane pare (parom dominantna ležišta) koje karakteriziraju iznimno visoke temperature što je rijetkost. Zbog toga postoje samo dva velika geotermalna polja gdje se geotermalni fluid koristi kao suha para, a to su geotermalno polje Larderello u Italiji i The Geysers u saveznoj državi Kaliforniji u Sjedinjenim Američkim Državama.

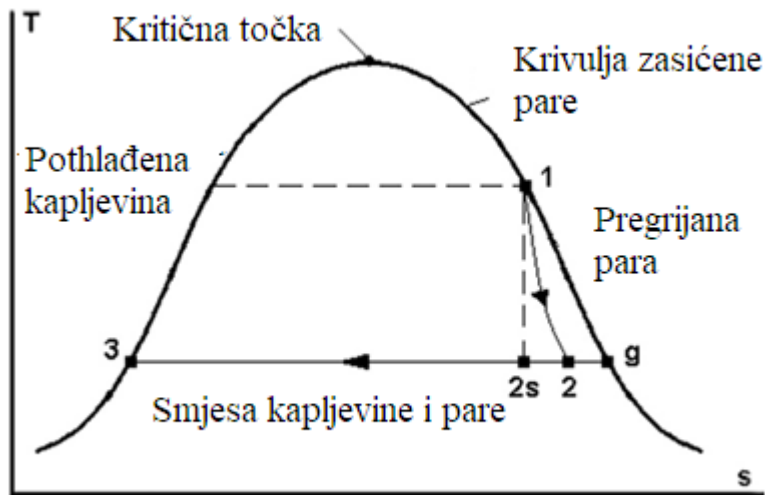
Ovakva postrojenja su prva korištena u komercijalne svrhe kada je 1904. godine Piero Ginori Conti izgradio postrojenje na suhu paru u Larderellu kako bi proizveo struju za rasvjetu u njegovoj tvornici (5 žarulja).

Geotermalni fluid u obliku zasićene ili pregrijane pare dolazi iz proizvodne bušotine te prelazi preko odstranjivača čestica kako bi spriječio krutim česticama koje su bile nošene parom da oštete opremu elektrane. Nakon toga para odlazi na turbinu koja pokreće elektrogenerator za dobivanje električne energije. Po izlazu iz turbine se para nalazi u mokrom području te se u kondenzatoru (najčešće rashladni toranj) kondenzira i utiskuje u zemlju utisnim bušotinama.



Slika 6. Postrojenje sa suhom parom (PW – proizvodna bušotina, WV – ventil proizvodne bušotine, PR – separator krutih čestica, SP – cjevovod pare, MR – odvlaživač, CSV – regulacijski i zaustavni ventili, T/G – turbina/ generator, C – kondenzator, CT – rashladni toranj, CWP – pumpa rashladne vode, CP – pumpa kondenzata, SE/C – separator pare/kondenzator, IW – utisna bušotina) [6]

Prikaz termodinamičkog procesa nalazi se na slici 7. gdje geotermalni fluid kao suha para (sa linije suhe zasićenosti), stanje 1, ekspandira do stanja 2s u idealnom slučaju dok u stvarnom slučaju završava u stanju 2. Nakon toga se kondenzira do stanja 3 i ispušta.

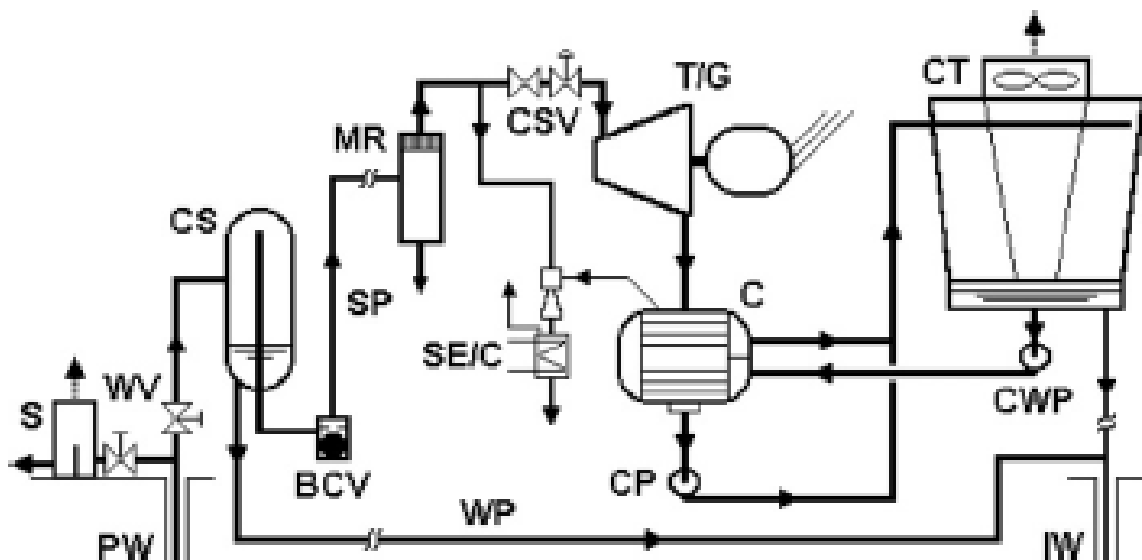


Slika 7. T-s dijagram za postrojenje sa suhom parom [6]

Postrojenja sa suhom parom su 2011. godine iznosila 12% svih geotermalnih elektrana, a proizvodile su 27% ukupno proizvedene električne energije. Prosječna snaga jednog postrojenja je 40,75 MW.

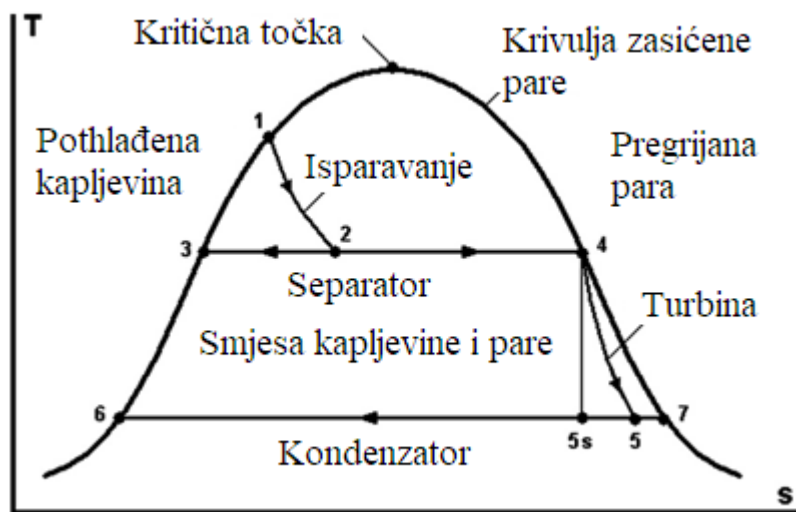
2.8.2. Postrojenja s isparavanjem geotermalnog fluida

Postrojenja s isparavanjem koriste se kada je geotermalni fluid iz vodom dominantnih ležišta kod kojih je geotermalni fluid pri visokoj temperaturi i tlaku, ali u stanju mokre pare. Zbog toga se geotermalni fluid isparava nakon što izađe iz proizvodne bušotine zbog nižeg tlaka u separatoru pare. Geotermalni fluid se razdvaja na kapljevitu i plinovitu fazu prije nego se plinovita faza pošalje na turbinu. Do razdvajanja faza najčešće dolazi u cilindričnoj ciklonskoj posudi pod tlakom uslijed velikih razlika u gustoći između kapljevite i plinovite faze. Ostatak procesa je uglavnom isti kao i kod postrojenja sa suhom parom.



Slika 8. Postrojenje s jednostrukim isparavanjem geotermalnog fluida (PW – proizvodna bušotina, WV – ventil proizvodne bušotine, S – prigušivač, CS – ciklonski separator, BCV – kuglasti povratni ventil, WP – cjevovod kapljevite vode, SP – cjevovod pare, MR – odvlaživač, CSV – regulacijski i zaustavni ventili, T/G – turbina/generator, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzata, CT – rashladni toranj, CWP – pumpa rashladne vode, SE/C – separator pare/kondenzator, IW – utisna bušotina) [6]

Prema T-s dijagramu s procesom s jednostrukim isparavanjem se geotermalni fluid pod tlakom (stanje 1) isparava (engl. „flashing“) do stanja 2. Geotermalni fluid stanja 4 se koristi za pokretanje turbine na isti način na koji se koristio kao i kod postrojenja sa suhom parom.



Slika 9. T-s dijagram za postrojenje s jednim isparavanjem geotermalnog fluida [6]

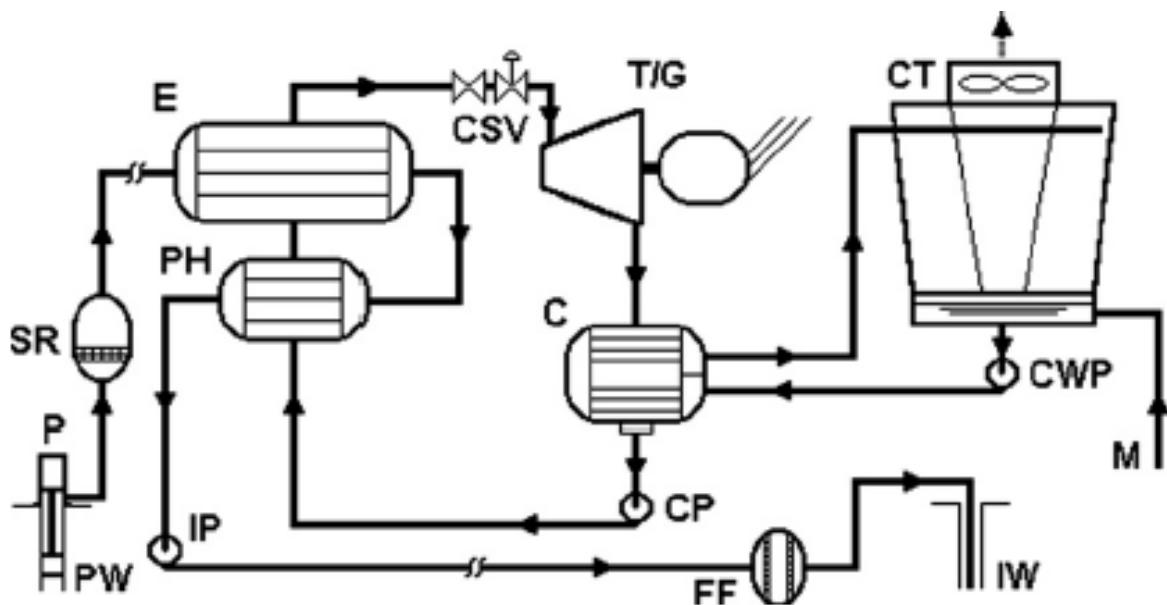
Kod postrojenja s jednostrukim isparavanjem geotermalni fluid pod tlakom se isparava jednom, a u postrojenjima s dvostrukim ili trostrukim isparavanjem se geotermalni fluid isparava dva, odnosno tri puta. Kapljevita faza se mora odvojiti od parne kako ne bi došlo do erozije ili stvaranja kamenca u turbini ili ostatku opreme. Postrojenja s isparavanjem su kompleksnija od postrojenja sa suhom parom zbog potrebe za razdvajanjem faza.

U 2011. godini je udio postrojenja s jednostrukim isparavanjem geotermalnog fluida bio 29% od svih geotermalnih elektrana i proizvodele su 43% električne energije. Snagom variraju između 3 MW i 117 MW, a u prosjeku su 27 MW. Kod tipične elektrane od 30 MW potrebno je do šest proizvodnih i do tri utisnih bušotina.

U 2011. godini bilo je 10% elektrana s dvostrukim isparavanjem geotermalnog fluida, a snagom variraju između 4,7 i 110 MW, s prosjekom od 31 MW po postrojenju. Postrojenja s dvostrukim isparavanjem bolja su od onih s jednostrukim jer daju veću snagu za isti geotermalni fluid, no puno su kompleksnija i financijski zahtjevnija. [6,14]

2.8.3. Binarna postrojenja

Binarna postrojenja koriste sekundarni fluid koji može biti čista tvar ili smjesa, a danas postoje postrojenja s ORC-om i Kalina procesom. Binarnih geotermalnih postrojenja ima najviše, no najveću snagu proizvode postrojenja s isparavanjem geotermalnog fluida. ORC koristi čistu organsku tvar kao radni medij. Organskih radnih medija ima stotinjak od kojih se najčešće upotrebljavaju propan, izobutan i izopentan pa je zbog toga ORC puno fleksibilniji po pitanju raspona temperatura u odnosu na Kalina proces koji koristi smjesu amonijaka i vode (najčešće u omjeru 70:30). Također, ORC koriste geotermalni fluid iz vodom dominantnih ležišta (kapljevita voda ili mokra para) koja su najčešća, a spadaju u kategoriju srednjotemperaturnih i niskotemperaturnih geotermalnih izvora. Teorijski ORC se provodi izentropskom kompresijom nakon koje slijedi izobarno zagrijavanje (isparavanje), izentropska ekspanzija i izobarno hlađenje (kondenzacija). [3,5,6,14]



Slika 10. Binarno postrojenje (PW – proizvodna bušotina, P – pumpa, SR – odstranjivač pijeska, E – isparivač, PH – predgrijač, IP – utisna pumpa, FF – konačni filter, IW – utisna bušotina, CSV – regulacijski i zaustavni ventili, T/G – turbina/generator, C – kondenzator, CP – pumpa kondenzata, CT – rashladni toranj, CWP – pumpa rashladne vode, M – voda za kompenzaciju) [6]

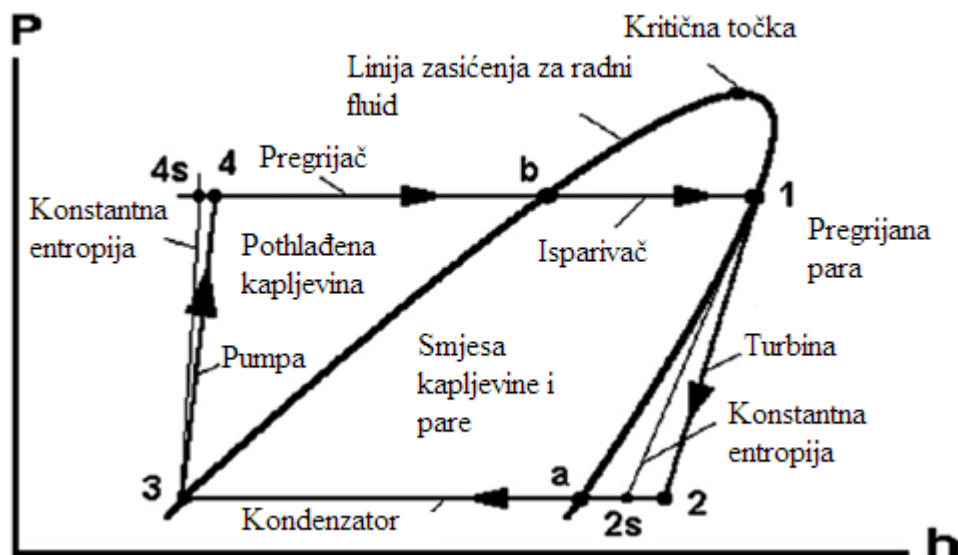
3. PREGLEDNI DIO

3.1. Organski Rankineov ciklus

Organski Rankineov ciklus (ORC) je termodinamički kružni proces pomoću kojega se može dobiti električna energija iz toplinskih izvora niže temperature. Izvori topline mogu biti:

- 1) geotermalni fluid
- 2) otpadna toplina (WHR)
- 3) solarna energija
- 4) biomasa

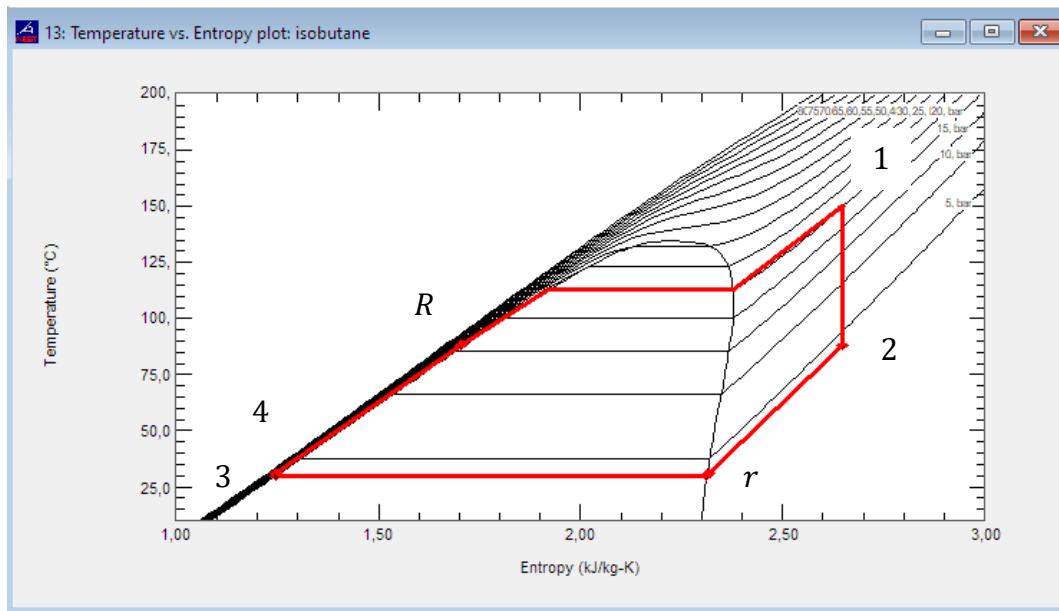
Toplinska energija izvora nije dovoljna da se primjeni tradicionalan Rankineov ciklus s vodenom parom, stoga se koristi organski radni medij. Oprema koja se koristi je uglavnom ista i se sastoji od ekspanzijskih strojeva, izmjenjivača topline (predgrijač, isparivač, pregrijač, kondenzator, rekuperator), pojne pumpe, sustava cjevovoda za geotermalni fluid i radni medij i elektrogeneratora. Ovisno o tome provodi li se ekspanzija do mokrog područja ili ne, može postojati potreba za instaliranjem rekuperatora kako bi se smanjili gubici topline kada se ekspanzija ne bi provodila sve do krivulje suho zasićene pare. Uz to je važna i oprema za mjerenje i regulaciju procesa. Važno je imati na umu da i vrsta geotermalnog izvora utječe na projektiranje elektrane. ORC proces za iskorištavanje geotermalne energije je termodinamički najbliži postrojenjima koje rade na fosilna goriva ili nuklearno gorivo, jer radni medij prolazi kroz stvarni zatvoreni proces. [14-16]



Slika 11. Prikaz ORC procesa u p-h dijagramu [6]

3.2. Proračun i shema opreme za ORC postrojenje

Na slici 12. je prikazan idealni ORC proces bez rekuperatora i sa rekuperatorom. U sljedećim poglavljima su priložene sheme i formule sa oznakama koje odgovaraju oznakama sa slike 12.



Slika 12. ORC proces bez rekuperatora (1-2-3-4-1) i sa rekuperatorom (1-2-r-3-4-R-1)

3.2.1. Ekspanzijski strojevi

Ekspanzijski strojevi ključni su za ORC proces jer zahvaljujući njima možemo dobiti električnu energiju iz geotermalnog izvora topline. Kod binarnih postrojenja poput ORC-a to se odvija preko radnog medija u sekundarnom optoku. Odabir vrste ekspanzijskog stroja i njegove dimenzije ovise o svojstvima radnog medija te o radnim uvjetima. Dijele se na dvije kategorije: [14]

1) turbostrojevi

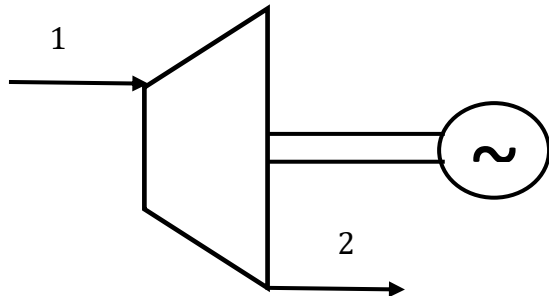
- a) aksijalne turbine – za snage veće od 0,5 MW i veće protoke
- b) centripetalne radijalne turbine (engl. „radial inward flow“) – za manje snage i manje protoke
- c) centrifugalne radijalne turbine (engl. „radial outward flow“) – koriste se kada je ekspanzija karakterizirana veliki omjerom volumena i velikim volumnim protokom

2) volumenski strojevi

Koriste se za snage manje od 100 kW. Određeni volumen radnog medija periodički ulazi u ekspander, ekspandira i ispušta se. Glavni tipovi volumenskih strojeva su klipni, spiralni, vijčani i lopatičasti ekspanderi. U usporedbi sa turbostrojevima, mogu se koristiti za ekspanziju do dvofaznog područja uz manju eroziju. Problemi kod ovakvih ekspandera su to što je teško

ostvariti višestupnjevitu ekspanziju i imaju jako nisku učinkovitost pri visokim volumnim omjerima.

3.2.1.1. Turbina



- rad turbine:

$$w_T = w_{1-2} = h_1 - h_2 \quad (3.1.)$$

- snaga turbine:

$$P_T = P_{1-2} = \dot{m} (h_1 - h_2) \quad (3.2.)$$

3.2.2. Izmjenjivači topline

Izmjenjivači topline u ORC postrojenju služe za izmjenu topline između geotermalnog fluida i radnog medija, između radnog medija i medija za hlađenje (zrak ili voda) i ukoliko postoji rekuperator onda se toplina izmjenjuje između tople struje radnog medija koji je završio ekspanziju i hladnog radnog medija koji je prošao kroz pojnu pumpu.

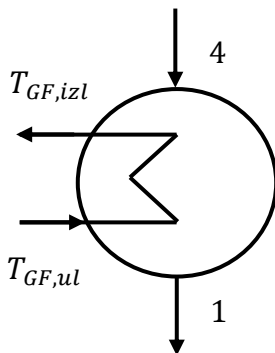
3.2.2.1. Zagrijači i isparivači

Najčešće upotrijebljeni izmjenjivači topline za ORC proces je snop cijevi u plaštu. On se sastoji od prednje glave, plašta (snop cijevi i plašt) i stražnje glave, te mogu biti s jednim ili više prolaza geotermalnog fluida. Geotermalni fluid najčešće struji kroz cijevi zbog opasnosti od stvaranja kamenca i korozije kako bi se cijevi lakše čistile ili po potrebi mijenjale umjesto da se mijenja cijeli izmjenjivač topline. Ukoliko se u geotermalni fluid ubacuju inhibitori korozije i kamenca onda on može protjecati na strani plašta pa je onda organski radni medij na strani cijevi.

Konstrukcija ovisi o primjeni, vrsti fluida, radnim uvjetima i o termodinamičkom procesu. Nažalost, kod konstruiranja izmjenjivača topline moraju se raditi kompromisi jer povećanje površine izmjene topline u izmjenjivaču topline je povoljno s termodinamičkog stanovišta zato što utječe na smanjenje generacije entropije i daje bolje performanse. S druge strane, povećanjem površine izmjene topline raste volumen cijelog izmjenjivača topline zbog čega su takvi izmjenjivači glomazni, teži i skuplji jer je za njihovu proizvodnju potrebno upotrijebiti više materijala.

Za podkritične procese koriste se rekuperatori, isparivači i pregrijači.

Za nadkritične procese (fazni prijelaz se odvija kontinuirano) ili kada se u procesu koristi smjesa radnih medija, izmjenjivač topline je konstruiran s jednim prolazom.



- toplina dovedena radnom mediju:

$$q_{dov} = q_{4-1} = h_4 - h_1 \quad (3.3.)$$

$$\dot{Q}_{dov} = \dot{Q}_{4-1} = \dot{m} (h_4 - h_1) \quad (3.4.)$$

- toplina geotermalnog fluida:

$$\dot{Q}_{GF} = \dot{m}_{GF} c_{p,GF} (T_{GF,ul} - T_{GF,izl}) \quad (3.5.)$$

- toplina koja se izmjenjuje u izmjenjivaču topline:

$$\dot{Q}_{IT} = K_{IT} A_{IT} \Delta T_{LM,IT} \quad (3.6.)$$

- srednja logaritamska temperaturna razlika:

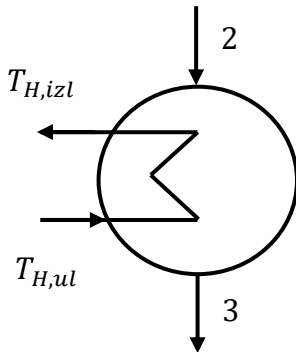
$$\Delta T_{LM,IT} = \frac{(T_{GF,ul} - T_1) - (T_{GF,izl} - T_4)}{\ln \frac{(T_{GF,ul} - T_1)}{(T_{GF,izl} - T_4)}} \quad (3.7.)$$

3.2.2.2 Kondenzator

Kondenzatori se koriste za odvod topline iz procesa (radni medij predaje toplinu rashladnom mediju). Odabir kondenzatora ovisi o tome odvodi li se toplina zrakom ili vodom. S obzirom na rashladni medij postoje dvije vrste kondenzatora koje se primjenjuju za odvođenje topline u ORC-procesu:

1) kondenzatori koji se hlade vodom – najčešće su izvedeni kao izmjenjivač topline sa snopom cijevi u plaštu.

2) kondenzatori koji se hlade zrakom – izvedba preuzeta iz HVAC-a (engl. „heating, ventilation and air conditioning“). Ovakvi kondenzatori zahtijevaju veliku površinu izmjene topline jer zrak ima loša prijenosna svojstva, stoga su jako velikih dimenzija pa zbog toga zauzimaju najveći prostor postrojenja. Izvedeni su sa bakrenim cijevima koje su poredane u redovima kroz koje radni medij prolazi nekoliko puta. Okolni zrak pokreće se ogromnim fenovima te hladi cijevi i u konačnici se radni medij kondenzira.



- toplina odvedena radnom mediju:

$$q_{odv} = q_{2-3} = h_2 - h_3 \quad (3.8.)$$

$$\dot{Q}_{odv} = \dot{Q}_{2-3} = \dot{m} (h_2 - h_3) \quad (3.9.)$$

- toplina rashladnog medija:

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H c_{p,H} (T_{H,izl} - T_{H,ul}) \quad (3.10.)$$

- toplina koja se izmjenjuje u kondenzatoru:

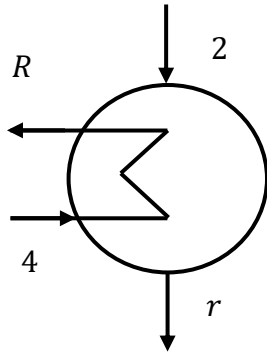
$$\dot{Q}_{kond} = K_{kond} A_{kond} \Delta T_{LM,kond} \quad (3.11.)$$

- srednja logaritamska temperaturna razlika:

$$\Delta T_{LM,kond} = \frac{(T_3 - T_{H,ul}) - (T_2 - T_{H,izl})}{\ln \frac{(T_3 - T_{H,ul})}{(T_2 - T_{H,izl})}} \quad (3.12.)$$

3.2.2.3. Rekuperator

Rekuperator je izmjenjivač topline koji nije nužan dio opreme za ORC proces te se primjenjuje kod radnih medija čija ekspanzija završava u pregrijanom području (suhi i izentropski radni mediji) kako bi se smanjili gubici topline. Radni medij nije predao svu moguću toplinu u turbini, stoga se postavljaju rekuperatori nakon turbine u kojemu radni medij nakon ekspanzije (više temperature) predaje dio topline radnom mediju nakon pojne pumpe (niže temperature). Nakon rekuperatora se radni medij koji je prethodno izašao iz turbine odvodi u kondenzator.

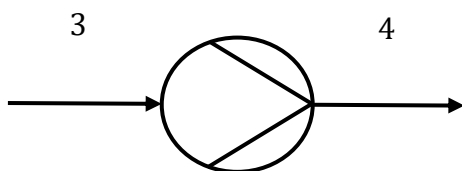


- toplina koju prima radni medij nakon pojne pumpe jednaka je toplini koju predaje radni medij nakon turbine, ali suprotnog predznaka u idealnom rekuperatoru:

$$\dot{Q}_{rekuperator} = \dot{Q}_{2-r} = \dot{m} c_{p,RM} (T_2 - T_r) = -\dot{Q}_{4-R} = -\dot{m} c_{p,RM} (T_4 - T_R) \quad (3.13.)$$

3.2.3. Pumpa

Kod ORC-a se primjenjuju više stupnjevite centrifugalne pumpe promjenjive brzine. Pumpa može imati vrijednost BWR-a i do 30% ukoliko se provodi proces u nadkritičnom području što značajno utječe na iskorištenje procesa. To može stvarati velike poteškoće pri postrojenjima koje razvijaju malu snagu.



- rad pumpe:

$$w_p = w_{3-4} = h_3 - h_4 \quad (3.14.)$$

- snaga pumpe:

$$P_p = P_{3-4} = \dot{m} (h_3 - h_4) \quad (3.15.)$$

3.3. Radni mediji

ORC postrojenja se dijele na dvije kategorije:

- proces s jednom razinom tlaka (engl. „single pressure level cycle“)

- podkritični proces
- transkritični proces
- nadkritični proces

jednostavan oblik postrojenja te su zbog toga najčešći

- proces s više razina tlaka (engl. „multi pressure level cycle“)

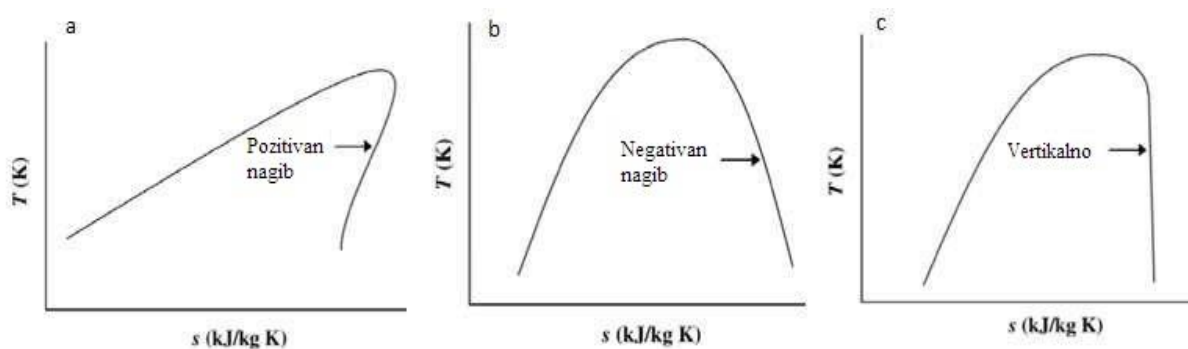
- podkritični ciklus

rijetko se upotrebljavaju iako mogu imati bolje iskorištenje od ORC-a s jednom razinom tlaka u procesu. Razlog je to što se postiže bolji temperaturni profil u izmjenjivačima topline, ali zbog toga postrojenje je kompleksnije jer je potreban veći broj izmjenjivača topline i najmanje dvije turbine. [14]

3.3.1. Klasifikacija radnih medija prema obliku krivulje

Radni mediji se dijele s obzirom na krivulju suho zasićene pare na:

- mokre fluide – negativan nagib krivulje suho zasićene pare: R134a, propan, voda
- suhe fluide – pozitivan nagib krivulje suho zasićene pare: izobutan, R236fa, R123
- izentropske fluide – krivulja suho zasićene pare je gotovo okomita na x-os u T-s dijagramu: R142b, R11, ciklopentan [14-17]



Slika 13. Vrste radnih medija: a) suhi (pozitivan nagib), b) mokri (negativan nagib) i c) izentropski (vertikalno) fluide [18]

3.3.2. Klasifikacija organskih radnih medija s obzirom na kemijski sastav

1. ugljikovodici
2. eteri
3. alkoholi
4. siloksani
5. fluorovodici
6. klorofluorougljici (CFC)
7. hidrokloroflorougljici (HCFC)
8. hidrofluorougljici (HFC)
9. hidrofluoroolefini (HFO) [19]

3.3.3. Usporedba organskih radnih medija i vode

ORC se primjenjuje za temperaturne raspone od 80°C do 350°C za proizvodnju električne energije.

Voda kao radni medij nije pogodna za temperature manje od 350°C zbog prevelike vlažnosti vodene pare na kraju ekspanzije što dovodi do erozije i nepovratnog oštećenja turbine, dok organski radni mediji pri istim temperaturama uglavnom završavaju u pregrijanom području pa kod njih ne dolazi do formiranja kapljica koje oštećuju turbinu. Štoviše, organski radni mediji imaju nižu kritičnu temperaturu i niže vrelište, uz to imaju manju promjenu entropije pri isparavanju zbog čega im pogoduju izvori topline nižih temperatura, odnosno manjeg sadržaja topline.

S druge strane, voda kao radni medij provodi ekspanziju do mokrog područja, dok organski radni mediji najčešće ne jer ih je velika većina izentropski ili suhi fluidi, što znači da je za poboljšanje ORC procesa često potreban rekuperator kako bi se iskoristio dio topline koji se nije iskoristio u turbini.

Za isti toplinski izvor, voda treba puno manje masene protoke jer ima veći specifični toplinski kapacitet od organskih radnih medija. Zbog toga organski radni mediji imaju veći rad pumpe. S druge strane, omjer volumena vode nakon i prije ekspanzije može iznositi 100 ili više zbog čega postoji potreba za više stupnjeva ekspanzije i većom opremom. Uz to je i kondenzacijski tlak vode daleko niži od atmosferskog pa može doći do prodiranja okolnog zraka u proces.

Kod odabira organskih radnih medija mora se voditi briga o sigurnosti (zapaljivosti i toksičnosti) i o ekološkim utjecajima (potencijal oštećenja ozona, ODP (engl. „ozone depleting potential“) i potencijal globalnog zatopljenja, GWP (engl. „global warming potential“)), dok voda nema štetnosti po pitanju sigurnosti i ekologije . [16]

3.3.4. Radni mediji za ORC

Čisti radni mediji imaju točno određenu temperaturu vrelišta za određeni tlak te im je proces isparavanja izoterman, odnosno profil promjene temperature u izmjenjivaču topline je konstantan tijekom isparavanja. Kod zeotropskih smjesa radnih medija temperatura vrelišta ovisi o sastavu radnog medija koji se prilikom isparavanja mijenja. Zbog toga se isparavanje ne odvija pri izotermnim uvjetima već postoji „klizanje“ profila temperature u izmjenjivaču topline. To „klizanje“ temperature ne omogućuje bolji prijenos topline, ali omogućuje bolje praćenje temperaturnog profila geotermalnog fluida koji zagrijava smjesu radnih medija ili medija za hlađenja i smjese radnih medija.

Prednost zeotropskih smjesa je to što pokazuju bolji energetski i eksergetski stupanj iskorištenja, također daju i veći rad zbog boljeg temperaturnog profila u izmjenjivačima topline pri dovodu i odvodu topline. Nedostaci su to što termodinamički podaci i koeficijenti prijenosa topline smjesa najčešće nisu dovoljno precizni i pouzdani, smjese često imaju niži koeficijent prijenosa topline zbog čega su izmjenjivači topline veći u odnosu na one kod čistih radnih medija. Promjena sastava uzrokuje nekonzistentna termodinamička svojstva smjese što negativno utječe na prijenos topline u izmjenjivačima topline. Zbog toga se mora paziti na to da ne dođe do curenja smjese radnih medija kako bi se spriječila promjena sastava.

Velike molekulske mase i faktori kompresibilnosti organskih radnih medija poboljšavaju učinkovitost turbine te utječu na manji broj stupnjeva kod aksijalnih turbina. S druge strane oni utječu na višu vrijednost kritične točke što zahtjeva bolji prijenos topline i veće izmjenjivače topline.

Visoka kritična točka, termička stabilnost i niski tlak para poželjna su svojstva radnog medija u ORC-u. Što je viša kritična točka radnog medija to je moguće ostvariti veći rad zbog veće ulazne temperature u turbinu i ekspanzije do nižeg tlaka zbog čega je velik pad entalpije prije i nakon turbine. To postaje problem ukoliko tlak nakon ekspanzije bude manji od atmosferskog zbog mogućeg prodiranja okolnog zraka u sustav. Osim toga, kod radnih medija s visokom kritičnom točkom postoji veliki omjer volumena prije i nakon ekspanzije (200 do 300) što zahtjeva veće dimenzije turbine za takve radne medije. Visoka kritična točka znači i da se proces može voditi kao podkritični ORC proces te se na taj način sprječava da pregrijavanjem dođe do termičkog raspadanja radnog medija. Rad pumpe se smanjuje kako raste kritična točka organskog radnog medija, pogotovo za one s kritičnom temperaturom većom od 150°C. Sve u svemu, radni mediji s višom kritičnom točkom daju bolje performanse.

Autori Babatunde i Sunday [20] daju listu poželjnih svojstava za odabir organskih radnih medija za ORC:

- termodinamičke značajke
- suhi ili izentropski radni mediji
- velika gustoća pare
- mala viskoznost
- visoka toplinska provodnost

- prihvatljiv tlak isparavanja
- kondenzatorski tlak veći od atmosferskog
- termička stabilnost
- niska točka ledišta/tališta
- visoka razina sigurnosti

3.4. Ekološki aspekti iskorištavanja geotermalne energije

Negativni utjecaji za okoliš se mogu svrstati u pet kategorija: [2,3]

- 1) fizički utjecaji vađenja geotermalnog fluida
- 2) toplinski učinci
- 3) kemijsko onečišćenje
- 4) biološki učinci
- 5) buka

3.4.1. Fizički utjecaji vađenja geotermalnog fluida

Kod iskorištavanja geotermalne energije u električne svrhe često dolazi do prekomjerne proizvodnje geotermalnog fluida te dolazi do deficita fluida koji nadopunjuje rezervoar. To je čest slučaj kod postrojenja sa suhom parom i sa isparavanjem geotermalnog fluida. Opasnost prekomjerne eksploatacije je smanjenje količine geotermalnog fluida u rezervoaru, slijeganje zemljišta i izazvana seizmičnost.

Smanjenje količine geotermalnog fluida u rezervoaru i slijeganje zemljišta sprječavaju se utiskivanjem geotermalnog fluida natrag u rezervoar. Izazvana seizmičnost može se pojaviti kod dugotrajne eksploatacije, slijeganja zemljišta i utiskivanjem geotermalnog fluida u rezervoar zato jer dolazi do promijene tlaka geotermalnog fluida što može potaknuti potres na mjestima gdje je najveće naprezanje u stijeni od koje je sačinjen rezervoar.

3.4.2. Toplinski učinci

Toplinski učinci na okoliš javljaju se kad se para geotermalnog fluida izbacuje u zrak čime se može lokalno utjecati na nastajanje oblaka i promjenu mikroklimе. Do toplinskog onečišćenja dolazi i kada se kondenzira radni medij jer on predaje toplinu zraku ili rashladnoj vodi koji se ispuštaju u okoliš. Također se javlja toplinsko onečišćenje kada se kapljeviti geotermalni fluid ispušta u površinske vode i pri tome utječe na povišenje temperature u dotičnoj rijeci ili jezeru. Sprječavanje toplinskog onečišćenja okoliša fokusira se na iskorištavanju topline geotermalnog fluida do temperature dovoljno niske da se može ispustiti u površinske vode što se može postići tako da se nakon iskorištavanja geotermalnog fluida u električne svrhe, on iskoristi i u

neelektrične svrhe, tj. za grijanje prostorija, u agronomiji ili slično. Postoji još jedno rješenje, a to je da se geotermalni fluid vraća u rezervoar.

3.4.3. Kemijsko onečišćenje

Kemijsko onečišćenje javlja se kada se geotermalni fluid ispušta u okoliš u obliku pare ili kapljevine. Geotermalni fluidi mogu sadržavati onečišćivače poput sumporovodika H_2S kojega ljudi mogu osjetiti pri koncentraciji 1ppm u zraku. CO_2 se također ispušta u elektranama sa suhom parom i isparavanjem geotermalnog fluida no ne u tolikoj mjeri kao kod onih sa fosilnim gorivima. Usporedbe radi, jedno postrojenje s isparavanjem geotermalnog fluida ispušta 0,5 kg CO_2 po MWh, dok postrojenje na prirodni plin ispušta 540 kg CO_2 , postrojenje na naftu ispušta 839 kg CO_2 , a postrojenje na ugljen ispušta 990 kg CO_2 po MWh. Amonijak (NH_3) koji se često nalazi otopljen u geotermalnom fluidu ne predstavlja opasnost za okoliš jer se u postrojenjima s isparavanjem oksidira do dušika (N_2) koji nije opasan za okoliš. Geotermalni fluid može sadržati bor (B), živu (Hg) i teške metale koji mogu onečistiti tlo i vegetaciju. Zbog toga je najbolje rješenje geotermalni fluid nakon upotrebe vratiti u rezervoar.

Osim problema vezanih s kemijskim onečišćenjem zbog tvari otopljenih u geotermalnom fluidu, također i radni medij može imati negativan utjecaj na okoliš. Velika većina radnih medija su zapaljiva, otrovna, s visokim ODP-om ili GWP-om, a mogu dospjeti u okoliš curenjem zbog neidealnog brtvljenja u opremi gdje se nalaze pri višem tlaku od atmosferskog tlaka.

3.4.4. Biološki učinci

Biološki učinci na okoliš su blisko povezani s toplinskim i kemijskim onečišćenjem. Porast temperature u nekoj površinskoj vodi može dovesti do odumiranja ekosustava u njemu, štoviše ispuštanjem geotermalnog fluida dopijevaju i teški metali u takav ekosustav što dodatno pogoršava situaciju.

3.4.5. Buka

Onečišćenje bukom vezano je uz buku koju proizvode strojevi koji se upotrebljavaju za bušenje bušotina i za ispuštanje geotermalnog fluida. Jakost zvuka pri takvim operacijama je između 90 dB i 120 dB. Onečišćenje bukom sprječava se ugradnjom prigušivača na opremu i primjenom zaštitne opreme za uši.

3.5. Geotermalna elektrana Velika 1

Geotermalna elektrana Velika 1 jedina je geotermalna elektrana u Hrvatskoj i radi sa binarnim organskim Rankineovim ciklusom te je najveća u Europi takve vrste. Smještena je u mjestu imena Ciglena koje je udaljeno oko 10km od Bjelovara, a to područje pripada geotermalnom

polju Velika Ciglena. Projekt same elektrane je financiran od domaćih i stranih investitora, a opremu je izradila talijanska kompanija Turboden.

Prva ispitivanja i bušenja na području geotermalnog polja Velika Ciglena provela je INA-Naftaplin devedesetih godina prošlog stoljeća u potrazi za fosilnim gorivima, no naišli su na geotermalnu vodu. Te postojeće bušotine financijski su olakšale realizaciju geotermalne elektrane Velika 1 koja je u pogonu od 2019. godine. [21]



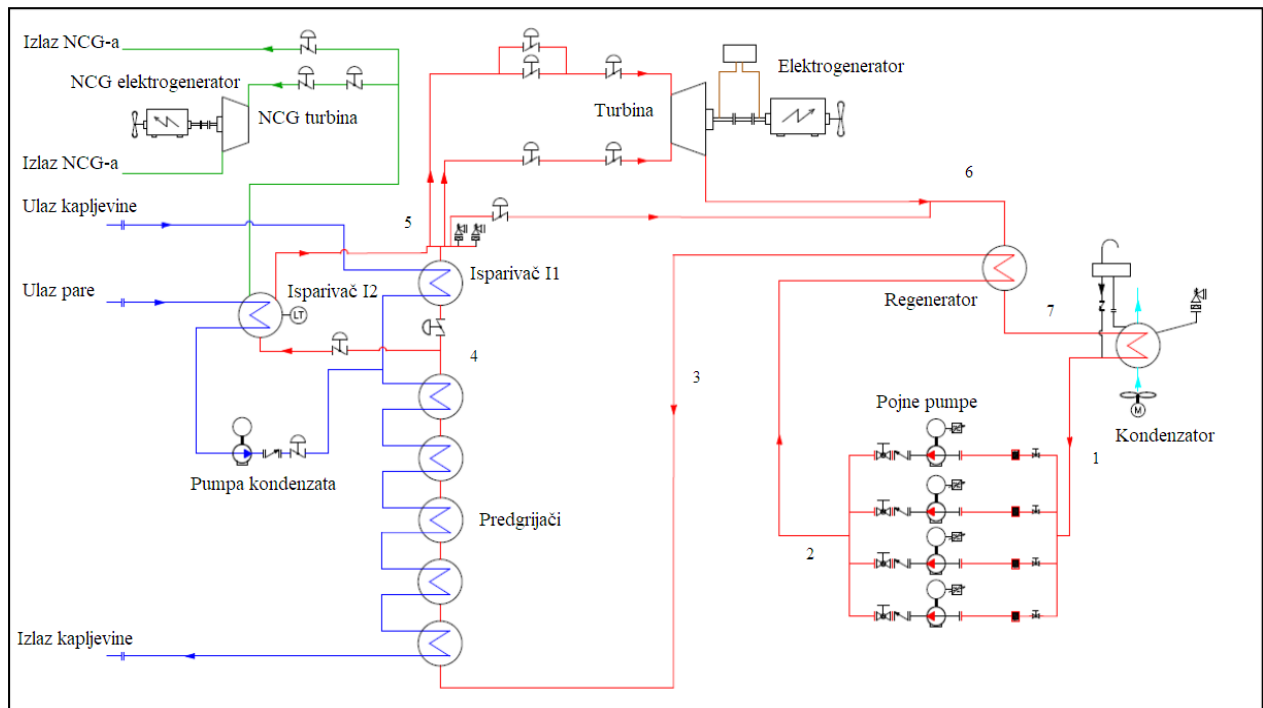
Slika 14. Geotermalna elektrana Velika 1 [21]

Elektrana danas proizvodi isključivo električnu energiju i njome opskrbljuje grad Bjelovar i okolicu. Iako Velika 1 ima puno veću snagu (16,5 MWe), ona ima sklopljen ugovor o otkupu električne energije s HROTE-om na 10 MWe što znači da može namiriti oko 29 000 kućanstava prema prosječnoj potrošnji energije u Republici Hrvatskoj. [21]

Geotermalni fluid vadi se iz dubine od oko 2500m te se nalazi na temperaturi od oko 170°C i na tlaku od 35bar, stoga ovaj geotermalni izvor spada u srednje temperature geotermalne izvore. Temperaturni gradijent je 0,062°C/m. Radni medij je izobutan (R600a, kritična temperatura je 134,66°C pri kritičnom tlaku 36,29bar) [9-12,21-23]

Turbina je izvedena kao aksijalna turbina s pet stupnjeva i može razviti snagu od 20 MW te ima izentropski stupanj iskorištenja koji varira oko vrijednosti od 90% s obzirom na vanjske uvjete. Brzina okretaja je 1500 o/min i nema potrebe za korištenjem reduktora. [23]

Opis procesa i prikaz P&I dijagrama (slika 15):



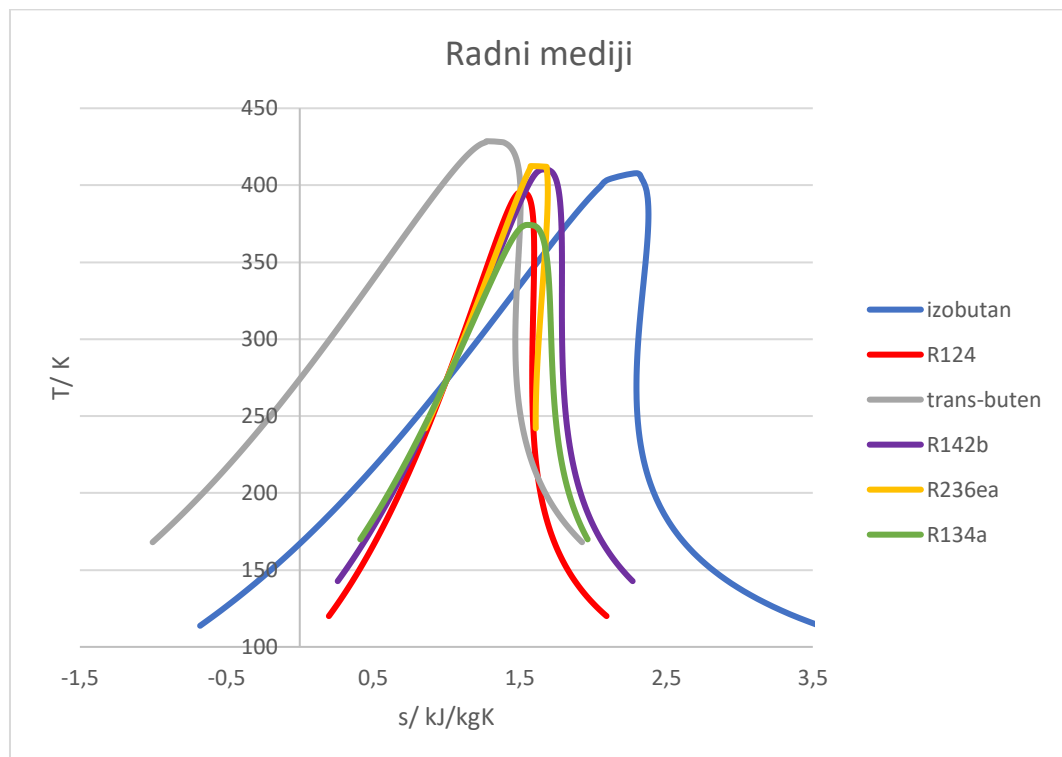
Slika 15. P&I dijagram geotermalne elektrane Velika 1 [23]

Primarni optok (geotermalni fluid): Geotermalni fluid se vadi u dva bunara (VC-1 i VC-1A) te odlazi na separator gdje se odvajaju kapljevita faza i plinovita faza (smjesa pare i NCG-a). Kapljevita faza se odvodi u isparivač (I1) gdje isparava radni medij (izobutan), dok se parna faza vodi na isparivač (I2) u kojemu se kondenzira vodena para i odvaja od nekondenzirajućih plinova (NCG, uglavnom CO_2 i H_2S) te se energija sadržana u njima iskorištava u NCG turbini za dobivanje električne struje, nakon čega se NCG ispuštaju u okoliš. Kondenzat iz isparivača (I2) miješa se sa vodom koja izlazi iz isparivača (I1). Takva voda prolazi kroz pet predgrijača u kojima se predgrijava radni medij. U slijedećem koraku se voda vraća u zemlju pomoću utisnih pumpi bunara za ponovno ubrizgavanje (VC-2 i Ptk-1).

Sekundarni optok (izobutan): radni medij se nakon hlađenja okolišnim zrakom i kondenzacije (1), pojnim pumpama (2) podiže na viši tlak te odlazi na regenerator topline (3) gdje preuzima dio toplote od radnog medija koji je izašao iz turbine (6). Zatim se radni medij predgrijava vodom u pet predgrijača (4), nakon kojih se jedan dio radnog medija šalje na isparivač 1 (grijan vodom), a drugi dio radnog medija ide na isparivač 2 (grijan parom). Te dvije struje radnog medija pri stanju 5 odvede se u turbinu gdje se radni medij ekspandira, pritom se pokreće turbina koja pokreće elektrogenerator te se dobiva električna energija. Nakon turbine, radni medij stanja 6 predaje dio toplote radnom mediju stanja 3 u regeneratu, nakon čega radni medij stanja 6 prelazi u stanje 7 te se kondenzira u zračnom kondenzatoru.

3.6. Usporedba radnih medija u ORC-u

Kako bi se pobliže analizirao ORC proces uzeto je 6 radnih medija kako bi se za njih proveo račun da se vidi kako na proces utječu promjena tlaka i temperature pri idealnim uvjetima. U oba slučaja uzeta je maksimalna temperatura koja odgovara kategoriji srednjetermperaturnih geotermalnih izvora (prema Benederitteru i Cormyju) s obzirom na to da su oni najpogodniji za primjenu ORC-a u svrhu dobivanja električne energije u Republici Hrvatskoj. Odabrani radni mediji su izobutan, R124, trans-buten, R142b, R236ea i R134a. Razlog odabira organskih radnih medija je što su im kritične točke unutar temperaturnog raspona od otprilike 50°C te se za njih može prikazati podkritični i transkritični proces za teoretsko geotermalno ORC postrojenje koje bi se moglo realizirati u Republici Hrvatskoj s obzirom na temperaturu geotermalnog fluida. Također, neki radni mediji su učestali u rashladnim sustavima ili se koriste za iskorištavanje geotermalne energije. Svi podaci o radnim medijima preuzeti su iz baze podataka REFPROP koja sadržava termodinamička i prijenosna svojstva za stotinjak radnih medija ili smjese radnih medija. Uz to, REFPROP ima mogućnost grafičkog prikazivanja ravnotežnih krivulja i crtanja točaka proizvoljnih termodinamičkih stanja. [17,24]



Slika 16. T-s dijagram za odabrane radne medije

Sigurnosne karakteristike organskih radnih medija određuju se s obzirom na zapaljivost i toksičnost. Prema slijedećoj kategoriji slova A znači niža toksičnost, B znači viša toksičnost, a brojevi 1 da nema propagacije plamena, 2 da je niska zapaljivost i 3 visoka zapaljivost radnog medija.

Ekološki aspekti obuhvaćaju vrijednosti ODP i GWP. ODP se odnosi na štetnost radnog medija prema ozonskom omotaču. Kada je ODP jednak nuli onda radni medij ne šteti ozonskom omotaču, a vrijednost 1 odgovara štetnosti triklorfluormetana. GWP je vrijednost koja govori o

tome koliki utjecaj ima radni medij na stvaranje efekta staklenika. GWP se određuje s obzirom na ugljikov dioksid (CO₂) koji ima vrijednost 1.

Nomenklatura, termodinamička svojstva, sigurnosna i ekološka svojstva radnih medija se mogu vidjeti u tablici 1.

Tablica 1. Odabrani radni mediji [16,17]

	izobutan	R124	trans-buten	R142b	R236ea	R134a
IUPAC	2-metilpropan	2-klor-1,1,1,2-tetrafluorethane	trans-2-buten	1-klor-1,1-difluoretan	1,1,1,2,3,3-heksafluorpropan	1,1,1,2-tetrafluoretan
T _{kr} / °C	134,66	122,28	155,46	137,11	139,29	101,06
p _{kr} / bar	36,29	36,243	40,273	40,55	35,02	40,593
ekspanzija	suha	suha	suha	izentropska	suha	mokra
sigurnost	A3	A1	A3	A2	nema podataka	A1
ODP	0	0,02	0	0,06	0	0
GWP	20	619	20	2220	1410	1300

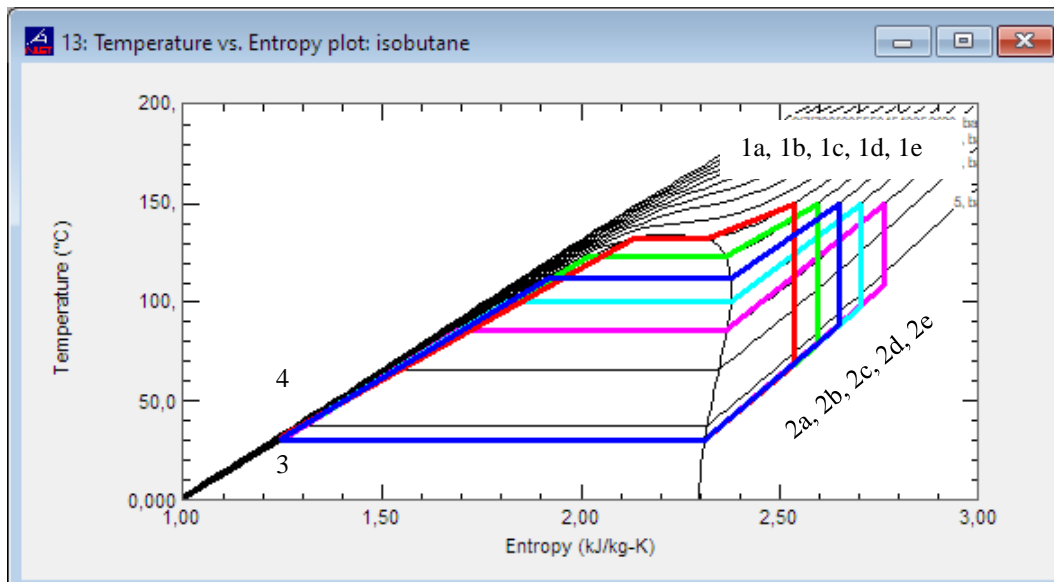
3.6.1. Usporedba procesa za konstantnu maksimalnu temperaturu

U prvom slučaju odabrana je maksimalna temperatura 150°C te se mijenja maksimalan tlak u procesu uz istu temperaturu kondenzacije od 30°C. Termodinamički podaci su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Termodinamički uvjeti za prvi slučaj usporedbe procesa

T _{max} / °C	150
T _{min} / °C	30
p _{max} / bar	15, 20, 25, 30, 35
p _{min} / bar	ovisi o radnom mediju

Na slici 17. je prikazan T-s dijagram za izobutan gdje se može vidjeti kako se ponaša ORC proces s promjenom maksimalnog tlaka.



Slika 17. T-s dijagram za izobutan pri promijeni p_{\max} u ORC-u

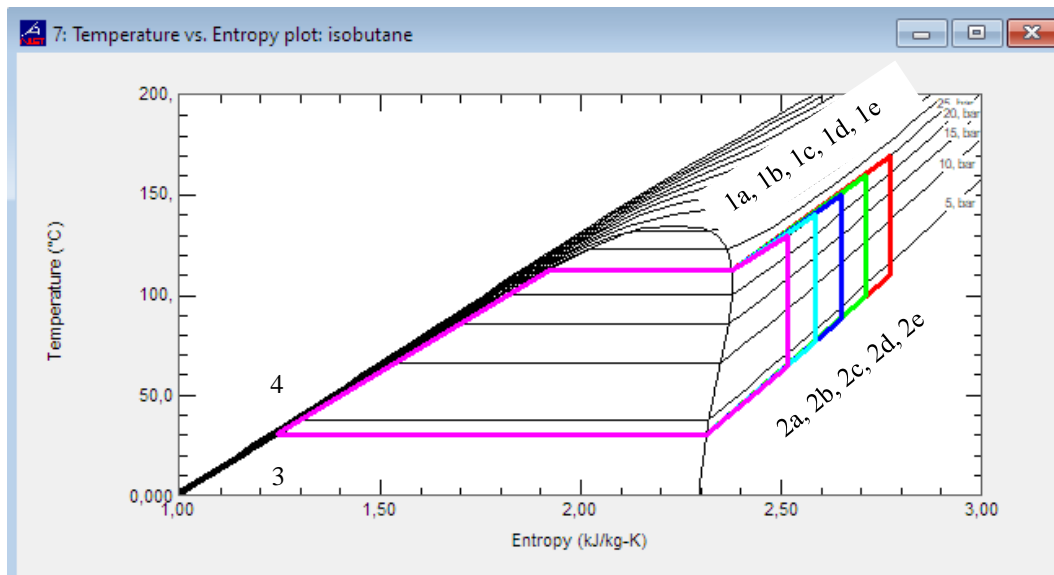
3.6.2. Usporedba procesa za konstantan maksimalan tlak

U drugom slučaju odabran je maksimalan tlak od 25bar te se mijenja maksimalna temperatura u procesu uz istu temperaturu kondenzacije od 30°C. Termodinamički podaci su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Termodinamički uvjeti za drugi slučaj usporedbe procesa

T_{\max} / °C	130, 140, 150, 160, 170
T_{\min} / °C	30
p_{\max} / bar	25
p_{\min} / bar	ovisi o radnom mediju

Na slici 18. prikazan je T-s dijagram za izobutan gdje se može vidjeti kako se ponaša ORC proces s promjenom maksimalne temperature.



Slika 18. T-s dijagram za izobutan pri promijeni T_{max} u ORC-u

Formule korištene za računanje termodinamičkih značajki:

- neto rad:

$$w_{neto} = w_T - w_P \quad (3.15.)$$

- termodinamički stupanj iskorištenja:

$$\eta_t = \frac{w_T - w_P}{q_{dov}} \cdot 100\% \quad (3.16.)$$

- BWR (engl. „back work ratio“) – omjer rada pumpe i rada turbine:

$$BWR = \frac{w_P}{w_T} \cdot 100\% \quad (3.17.)$$

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. Sigurnosna i ekološka usporedba organskih radnih medija

Izobutan je radni medij s niskom toksičnošću i visokom zapaljivosti. Ne utječe na razaranje ozonskog omotača i vrijednost GWP-a mu je najniža od odabrane skupine radnih medija.

Trans-buten ima ista svojstva kao i izobutan.

R124 je radni medij s niskom toksičnošću i ne propagira plamen. Utječe na razaranje ozonskog omotača (ODP = 0,02) zbog jednog klorovog atoma kojeg sadrži, te mu je vrijednost GWP-a druga najniža.

R142b je medij s niskom toksičnošću i niskom zapaljivosti. Razorno djeluje na ozonski omotač s najvećom vrijednosti ODP-a među odabranim radnim medijima. Također mu je i vrijednost GWP-a najviša.

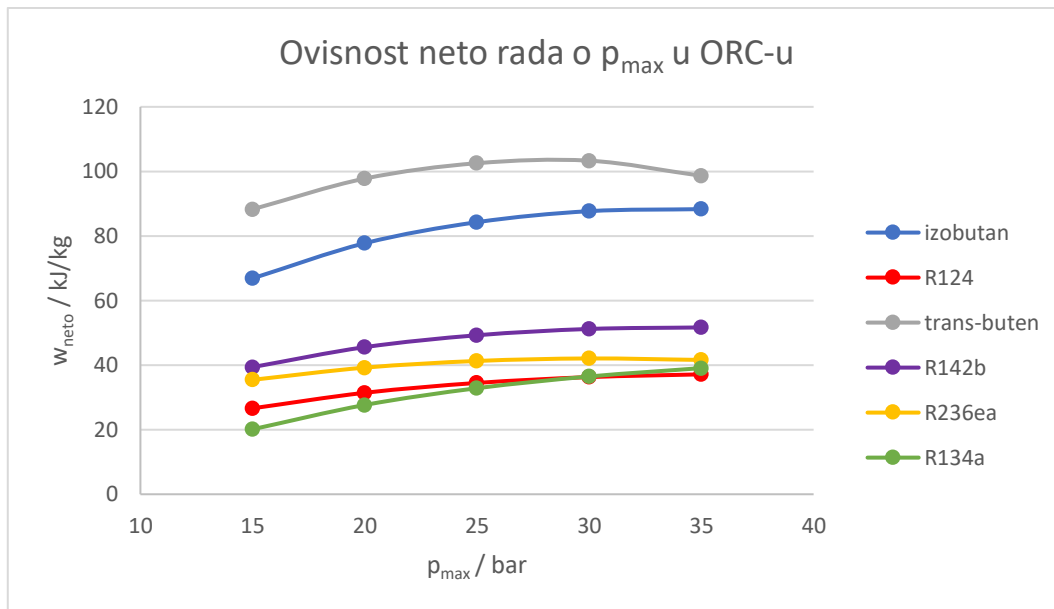
R236ea je radni medij za kojega nisu priloženi podaci o toksičnosti i zapaljivosti, vrijednost ODP-a mu je 0, a GWP-a druga po veličini.

R134a ima nisku toksičnost i ne propagira plamen. Ne utječe na razaranje ozonskog omotača, a vrijednost GWP-a mu je nešto niža od R236ea.

4.2. Termodinamička usporedba organskih radnih medija

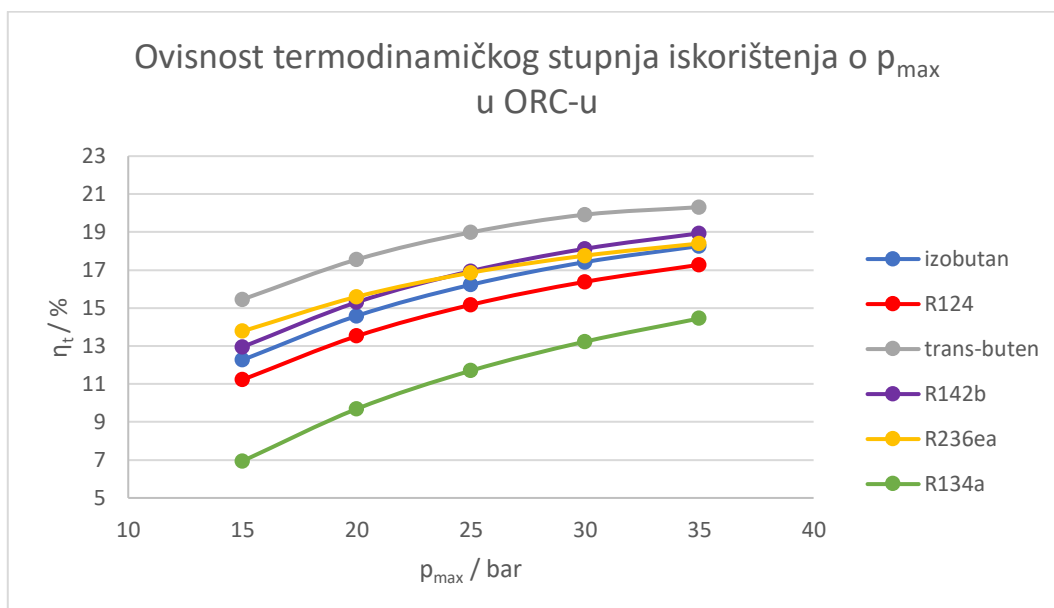
4.2.1. Usporedba za $T_{\max} = \text{konst.}$

Na slici 19. vidi se kako najveći neto rad ima proces sa trans-butenom kao radnim medijem. Njemu konkurira jedino izobutan. Trendovi svih radnih medija su u obliku parabole, svima raste neto rad sve do određene maksimalne vrijednosti. Važno je naglasiti kako je neto rad uglavnom određen vrijednošću rada turbine. Maksimum za trans-buten se nalazi negdje blizu 30bar, a vrijednost neto rada pri 30bar je 103,33 kJ/kg. Razlog zašto svi radni mediji pokazuju ovakav trend je zato što dolazi do rasta rada pumpe porastom tlaka, uz postepenu stagnaciju rasta rada turbine.



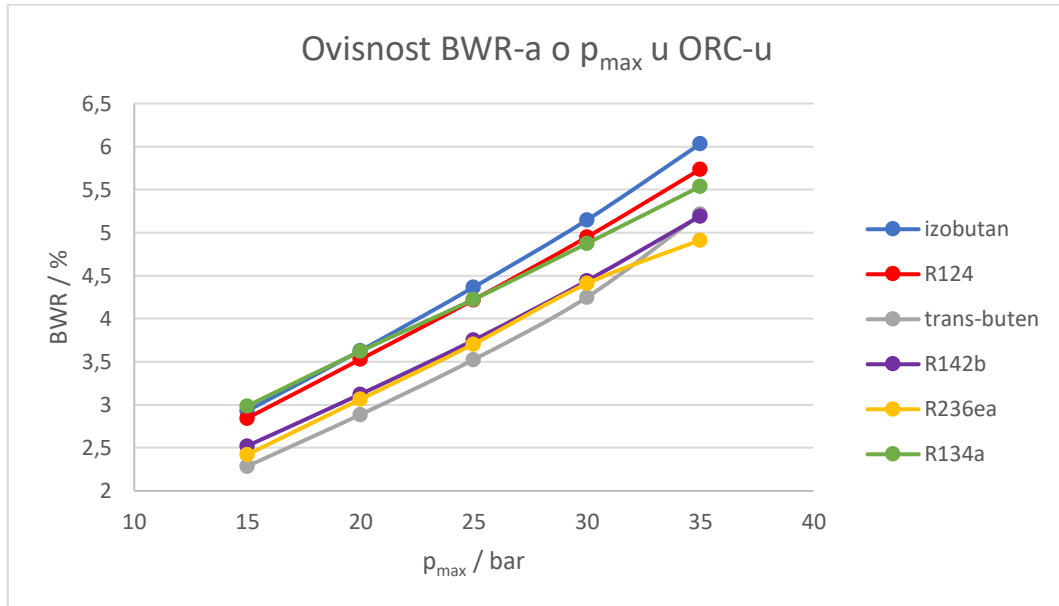
Slika 19. Ovisnost neto rada o maksimalnom tlaku

Na slici 20. se vidi kako najveći termodinamički stupanj iskorištenja ima proces sa trans-butenom kao radnim medijem. Trendovi svih radnih medija su slični i ponašaju se poput trendova za neto rad, s naznakom da maksimum stupnja iskorištenja nije postignut za dan raspon maksimalnih tlakova. Važno je naglasiti kako R134a jako negativno odstupa od ostalih radnih medija (pri 15bar je 61,83% vrijednosti termodinamičkog stupnja iskorištenja od R124), dok trans-buten blago odskaače od ostalih radnih medija sa višim stupnjevima iskorištenja za cijeli raspon maksimalnog tlaka.



Slika 20. Ovisnost termodinamičkog stupnja iskorištenja o maksimalnom tlaku

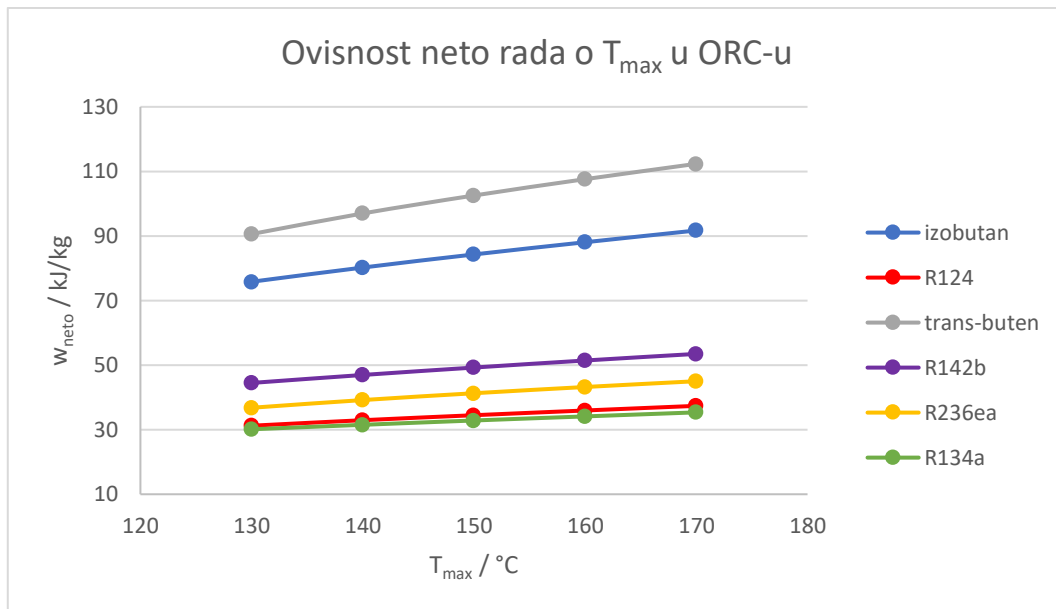
Na slici 21. može se vidjeti kako nema prevelikih odstupanja kod vrijednosti BWR-a. Svi radni mediji imaju porast BWR-a s porastom maksimalnog tlaka. To je bilo očekivano jer rad pumpe raste porastom maksimalnog tlaka u sustavu bez obzira na radni medij. Rad turbine ima trend sličan trendu neto rada, nakon što se porastom tlaka pređe maksimalna vrijednost rada turbine, BWR naglo počinje rasti. To se može uočiti kod naglog skoka vrijednosti BWR-a za trans-buten nakon što je pređen maksimum neto rada (rada turbine).



Slika 21. Ovisnost BWR-a o maksimalnom tlaku

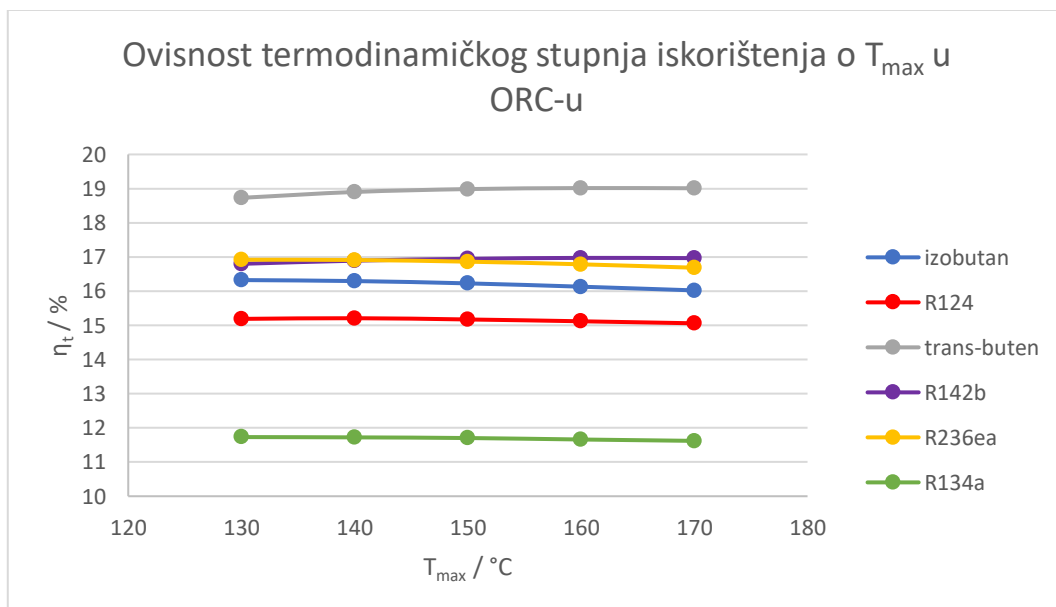
4.2.2. Usporedba za $p_{\max} = \text{konst.}$

Slika 22. prikazuje ovisnost neto rada o maksimalnoj temperaturi gdje se može uočiti kako trans-buten i izobutan odstupaju od ostalih radnih medija. Svi radni mediji prikazuju povećanje neto rada s povećanjem maksimalne temperature u procesu što je i za očekivati budući da raste i Carnotov stupanj iskorištenja. Najveću vrijednost neto rada ima trans-buten, a najmanju R134a za cijeli raspon temperatura.



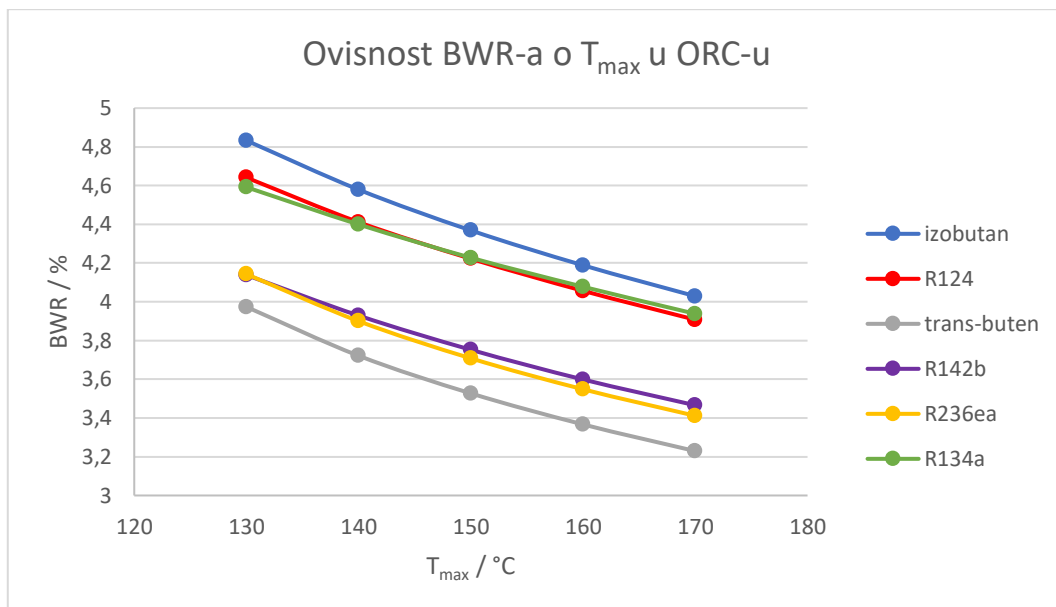
Slika 22. Ovisnost neto rada o maksimalnoj temperaturi

Na slici 23. može se vidjeti kako povećanje maksimalne temperature u procesu nema benefita po pitanju termodinamičkog stupnja iskorištenja. Razlog tome je što raste rad turbine, ali isto tako raste i vrijednost dovedene topline. Niti jednom radnom mediju se termodinamički stupanj iskorištenja bitno ne mijenja. Najveći termodinamički stupanj iskorištenja je kod trans-butena (pri 160°C je 19,02%) koji daleko odstupa od ostalih radnih medija, dok R134a daleko odstupa od ostalih radnih medija, ali u negativnom smislu.



Slika 23. Ovisnost termodinamičkog stupnja iskorištenja o maksimalnoj temperaturi

Sa slike 24. može se vidjeti kako BWR svih radnih medija opada porastom maksimalne temperature u procesu. Naime, s obzirom da nema promjene tlaka u procesu (niti minimalnog niti maksimalnog), nema niti promjene rada pumpe. Zbog toga BWR isključivo ovisi o radu turbine koji raste porastom temperature, a zbog recipročne ovisnosti BWR opada.



Slika 24. Ovisnost BWR-a o maksimalnoj temperaturi

5. ZAKLJUČAK

Geotermalne energije ima u izobilju, a ekonomski isplative izvore ovog obnovljivog i održivog oblika energije potrebno je tražiti uz konvergentnu granicu tektonskih ploča. Republika Hrvatska ima nekoliko srednjetermperaturnih geotermalnih ležišta od kojih se u električne svrhe iskorištava samo jedno, što znači kako se geotermalna energija u Republici Hrvatskoj ne iskorištava u potpunosti i da postoji potencijal za daljnje iskorištavanje.

Binarna postrojenja ostavljaju najmanji utjecaj na okoliš u odnosu na ostale vrste geotermalnih elektrana jer ne ispuštaju geotermalni fluid u okoliš već ga vraćaju u utisnim bušotinama. Na taj se način sprječava onečišćenje površinskih voda i tla, a također nadopunjava količinu geotermalnog fluida u podzemnom rezervoaru što umanjuje utjecaj na slijeganje zemljišta.

Od šest odabranih organskih radnih tvari trans-buten se pokazao kao najbolji izbor za oba slučaja jer ima dobra termodinamička svojstva (najveći neto rad i iskorištenje), nisku vrijednost GWP-a i ODP-a, ali negativna strana je što je jako zapaljiv. To pokazuje kako ne postoji neki idealni organski radni medij, već se uvijek moraju raditi kompromisi. R134a se pokazao kao najgori radni medij u oba slučaja jer daje najmanji neto rad uz najniži termodinamički stupanj iskorištenja.

Rezultati pokazuju kako neto rad i termodinamički stupanj iskorištenja rastu s porastom vrijednost kritične temperature radnih medija. Zbog toga je trans-buten s najvišom kritičnom temperaturom imao najbolja termodinamička svojstva, a R134a najgora. Kada je maksimalna temperatura bila konstantna, pokazalo se kako pregrijavanje odabranih radnih medija nije potrebno jer se pregrijavanjem dobiva manji neto rad. Razlog tome je što se pri nižim tlakovima, odnosno kada je ekspanzija više u pregrijanom području, dobiva manji rad turbine, a također se pri ekspanziji na nižim maksimalnim tlakovima puno više topline koju nosi pregrijana para baca na izlazu iz turbine. Ona nije obavila rad (nepotrebno se kondenzira) i to umanjuje vrijednost termodinamičkog stupnja iskorištenja. Kada su maksimalni i minimalni tlak u ORC-u fiksni, povećanje maksimalne temperature će dovesti do većeg neto rada, ali termodinamički stupanj iskorištenja neće se bitno mijenjati zbog potrebe za većim dovodom topline.

6. POPIS SIMBOLA KORIŠTENIH U RADU

A_{IT} – površina izmjenjivača topline za dovod topline [m^2]

A_{kond} – površina izmjenjivača topline za odvod topline (kondenzator) [m^2]

BWR – engl. „back work ratio“, omjer rada pumpe i rada turbine [%]

$c_{p,GF}$ – specifični toplinski kapacitet geotermalnog fluida [J/kgK]

$c_{p,H}$ – specifični toplinski kapacitet medija za odvod topline [J/kgK]

$c_{p,RM}$ – specifični toplinski kapacitet radnog medija [J/kgK]

GWP – potencijal globalnog zatopljenja (engl. „global warming potential“)

h_1 – specifična entalpija radnog medija nakon dovoda topline, prije ulaza u turbinu [J/kg]

h_2 – specifična entalpija radnog medija nakon izlaza iz turbine, prije ulaza u kondenzator [J/kg]

h_3 – specifična entalpija radnog medija nakon izlaza iz kondenzatora, prije ulaza u pumpu [J/kg]

h_4 – specifična entalpija radnog medija nakon izlaza iz pumpe, prije dovoda topline [J/kg]

K_{IT} – koeficijent prolaza topline u izmjenjivaču topline za dovod topline [$J/s^{\circ}Cm^2$]

K_{kond} – koeficijent prolaza topline u kondenzatoru [$J/s^{\circ}Cm^2$]

\dot{m} – maseni protok radnog medija [kg/s]

\dot{m}_{GF} – maseni protok geotermalnog fluida [kg/s]

\dot{m}_H – maseni protok medija za odvod topline [kg/s]

NCG – nekondenzirajući plinovi (engl. „non-condensable gases“)

ODP – potencijal oštećenja ozona (engl. „ozone depleting potential“)

ORC – organski Rankineov ciklus (engl. „organic Rankine cycle“)

p_{kr} – kritični tlak [bar]

p_{max} – maksimalni tlak u procesu [bar]

p_{min} – minimalni tlak u procesu [bar]

$P_P = P_{3-4}$ – snaga pumpe, snaga utrošena da radni medij stanja 3 dođe u stanje 4 [W]

$P_T = P_{1-2}$ – snaga turbine, snaga dobivena pri prelasku radnog medija stanja 1 u stanje 2 [W]

$T_{GF,izl}$ – temperatura geotermalnog fluida na izlazu iz izmjenjivača topline za dovod topline [$^{\circ}C$]

$T_{GF,ul}$ – temperatura geotermalnog fluida na ulazu u izmjenjivač topline za dovod topline [$^{\circ}C$]

$T_{H,izl}$ – temperatura medija za odvod topline na izlazu iz kondenzatora [$^{\circ}\text{C}$]

$T_{H,ul}$ – temperatura medija za odvod topline pri ulazu u kondenzator [$^{\circ}\text{C}$]

T_{kr} – kritična temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

$\Delta T_{LM,IT}$ – srednja logaritamska temperaturna razlika u izmjenjivaču topline za dovod topline [$^{\circ}\text{C}$ ili K]

$\Delta T_{LM,kond}$ – srednja logaritamska temperaturna razlika u kondenzatoru [$^{\circ}\text{C}$ ili K]

T_{max} – maksimalna temperatura u procesu [K]

T_{min} – minimalna temperatura u procesu [K]

$q_{dov} = q_{4-1}$ – jedinična dovedena toplina da radni medij stanja 4 dođe u stanje 1 [J/kg]

$\dot{Q}_{dov} = \dot{Q}_{4-1}$ – doveden toplinski tok, radni medij stanja 4 prelazi u stanje 1 [J/s]

$q_{odv} = q_{2-3}$ – jedinična odvedena toplina da radni medij stanja 2 dođe u stanje 3 [J/kg]

$\dot{Q}_{odv} = \dot{Q}_{2-3}$ – odveden toplinski tok, radni medij stanja 2 prelazi u stanje 3 [J/s]

\dot{Q}_{GF} – toplinski tok geotermalnog fluida [J/s]

\dot{Q}_H – toplinski tok medija za odvod topline [J/s]

\dot{Q}_{IT} – toplinski tok u izmjenjivaču topline za dovod topline [J/s]

\dot{Q}_{kond} – toplinski tok u kondenzatoru [J/s]

$\dot{Q}_{rekuperator}$ – toplinski tok u rekuperatoru [J/s]

w_{neto} – jedinični neto rad [J/kg]

$w_p = w_{3-4}$ – jedinični rad pumpe, rad utrošen da radni medij stanja 3 dođe u stanje 4 [J/kg]

$w_T = w_{1-2}$ – jedinični rad turbine, rad dobiven pri prelasku radnog medija stanja 1 u stanje 2 [J/kg]

η_t – termodinamički stupanj iskorištenja [%]

7. LITERATURA

- [1] <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/explainer-earth-layer-layer> (pristup 9. kolovoza 2021.)
- [2] Dickson, M. H., Fanelli, M., Geothermal energy: utilization and technology, Bangalore, India, UNESCO, 2003.
- [3] Gupta, H., Roy, S., Geothermal Energy: An Alternative Resource For The 21st Century, Amsterdam: Elsevier B. V., 2007.
- [4] <https://www.nps.gov/subjects/geology/plate-tectonics-evidence-of-plate-motions.htm> (pristup 22. srpnja 2021.)
- [5] Mustapić, N., Guzović, Z., Staniša, B., Energetski strojevi i sustavi, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2013.
- [6] DiPippo, R., Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact, 3rd edition, United States of America: Elsevier Ltd., 2012.
- [7] Hutterer, G.W., Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report, Proceedings World Geothermal Congress 2020, Island, Reykjavik, 2020.
- [8] <https://www.thinkgeoenergy.com/map/> (pristup 12. kolovoza 2021.)
- [9] Getliher, A., Cazin, V., Muršić, R., INA-Naftaplin, Geotermalna energija kao obnovljivi resurs postoji u Hrvatskoj, ali se nedovoljno iskorištava za njen gospodarski razvitak, Proceedings of 3rd International oil and gas conference, Hrvatska, Zadar, 2005., str. 7-16
- [10] Kolbah, S., Kulenović, I., Vučemilović, M., INA-Naftaplin, Proizvodnja geotermalne energije u panonskom bazenu Republike Hrvatske – izdvajanje objekata, Proceedings of 3rd International oil and gas conference, Hrvatska, Zadar, 2005., str. 25-52
- [11] Kovačević, Z., Geotermalna energija u Hrvatskoj, Naftaplin, 18 (2001), 1; str. 59-64
- [12] Pravica, Z., Kulenović, I., INA-Naftaplin, Primjena termosifonskog učinka na geotermalnom polju Velika Ciglena, Proceedings of 3rd International oil and gas conference, Hrvatska, Zadar, 2005, str. 93-104
- [13] https://www.google.com/search?q=geotermalna+energija+u+hrvatskoj&sxsrf=ALeKk03p5PYbWt2O6Z8c-wM5vxU37OZYIw:1628537894736&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj8wN-12KTyAhWLz4UKHcnVBcQQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=880#imgrc=-B6Pbxz6sb_bNM (pristup 9. kolovoza 2021.)
- [14] Macchi, E., Astolfi, M., Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems Technologies and Applications, Elsevier Ltd., 2017.
- [15] Quoilin, S., Sustainable Energy Conversion Through the Use of Organic Rankine Cycles for Waste Heat Recovery and Solar Applications, Presented to the Faculty of Applied Science of the University of Liège, Belgija, 2011.

- [16] Nouman, J., Comparative studies and analyses of working fluids for Organic Rankine Cycles – ORC, Master of Science Thesis EGI-2012-086MSC, Švedska, 2012.
- [17] Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, verzija 8.0, Ministarstvo trgovine S.A.D.-a, 2007.
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Types-of-working-fluids-a-dry-b-wet-c-isentropic-based-on-saturation-vapor-curve-2_fig1_280384931 (pristup 19. kolovoza 2021.)
- [19] Čehajić, N., Halilčević, S., Softić, I., PRIMJENA ORGANSKOG RANKINOVOG CIKLUSA (ORC) I PRIKLADNI RADNI FLUIDI, Tehnički glasnik 8 (2014), str. 229-237
- [20] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/413/1/012019/pdf> (pristup 10. kolovoza 2021.)
- [21] <https://oie.hr/svecano-otvorena-prva-geotermalna-elektrana-u-hrvatskoj-velika-1/> (pristup 11. kolovoza 2021.)
- [22] <https://balkangreenenergynews.com/croatias-first-geothermal-power-plant-velika-1-officially-unveiled/> (pristup 15. srpnja 2021.)
- [23] <http://theargeo.org/fullpapers/THE%20VELIKA%20CIGLENA%20GEOTHERMAL%20BINARY%20POWER%20PLANT.pdf> (pristup 15. srpnja 2021.)
- [24] Thurairaja, K., Wijewardane, A., Jayasekara, S., Ranasinghe, C., Working Fluid Selection and Performance Evaluation of ORC, International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2018, Nagoya, Japan, 2018, str. 244-248
- [25] <https://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/3.2.Corrosion&Scaling.pdf> (pristup 13. kolovoza 2021.)

8. PRILOZI

REFPROP (isobutane) - NIST Reference Fluid Properties

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

1: isobutane: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Volume (ml/kg)	Density (kg/ml)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	150,00	15,000	0,034855	28,691	818,50	2,7655	Superheated
2	109,08	4,0472	0,12858	7,7775	749,60	2,7655	Superheated
3	30,000	4,0472	0,095422	10,480	594,57	2,3123	1,0000
4	30,000	4,0472	0,0018372	544,31	271,24	1,2458	0,00000
5	30,591	15,000	0,0018314	546,02	273,26	1,2458	Subcooled
6							

2: isobutane: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (bar)	Volume (ml/kg)	Density (kg/ml)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Quality (kg/kg)
1	150,00	20,000	0,024544	40,742	807,27	2,7044	Superheated
2	98,059	4,0472	0,12420	8,0513	726,58	2,7044	Superheated
3	30,000	4,0472	0,095422	10,480	594,57	2,3123	1,0000
4	30,000	4,0472	0,0018372	544,31	271,24	1,2458	0,00000
5	30,855	20,000	0,0018289	546,79	274,17	1,2458	Subcooled
6							

Current Fluid: isobutane Ref. State: Default

Slika 25. Prikaz računanje termodinamičkih stanja pomoću baze podataka REFPROP

Tablica 4. Rezultati proračuna za izobutan pri $T_{\max} = \text{konst.}$

P_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	68,9	2,02	12,26616	2,931785	66,88
20	80,69	2,93	14,58638	3,631181	77,76
25	88,13	3,85	16,22735	4,368546	84,28
30	92,45	4,76	17,42128	5,148729	87,69
35	93,99	5,67	18,26529	6,032557	88,32

Tablica 5. Rezultati proračuna za izobutan pri $p_{max} = konst.$

T_{max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	79,67	3,85	16,32433	4,832434	75,82
140	84,08	3,85	16,29532	4,578972	80,23
150	88,13	3,85	16,22735	4,368546	84,28
160	91,92	3,85	16,13063	4,188425	88,07
170	95,56	3,85	16,02173	4,028882	91,71

Tablica 6. Rezultati proračuna za R124 pri $T_{max} = konst.$

P_{max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	27,4	0,78	11,22307	2,846715	26,62
20	32,58	1,15	13,52119	3,529773	31,43
25	36	1,52	15,17138	4,222222	34,48
30	38,18	1,89	16,38375	4,950236	36,29
35	39,4	2,26	17,27844	5,736041	37,14

Tablica 7. Rezultati proračuna za R124 pri $p_{max} = konst.$

T_{max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	32,75	1,52	15,18895	4,641221	31,23
140	34,46	1,52	15,20846	4,410911	32,94
150	36	1,52	15,17138	4,222222	34,48
160	37,47	1,52	15,11838	4,056579	35,95
170	38,9	1,52	15,05922	3,907455	37,38

Tablica 8. Rezultati proračuna za trans-buten pri $T_{max} = konst.$

P_{max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	90,35	2,067	15,45371	2,28777	88,283
20	100,69	2,908	17,5566	2,888072	97,782
25	106,29	3,749	18,98584	3,527143	102,541
30	107,92	4,588	19,91969	4,251297	103,332
35	104,07	5,427	20,31221	5,214759	98,643

Tablica 9. Rezultati proračuna za trans-buten pri $p_{\max} = \text{konst.}$

T_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	94,35	3,749	18,72997	3,973503	90,601
140	100,74	3,749	18,90213	3,721461	96,991
150	106,29	3,749	18,98584	3,527143	102,541
160	111,35	3,749	19,01541	3,366861	107,601
170	116,1	3,749	19,01026	3,229113	112,351

Tablica 10. Rezultati proračuna za R142b pri $T_{\max} = \text{konst.}$

P_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	40,41	1,02	12,95042	2,524128	39,39
20	47,04	1,47	15,30427	3,125	45,57
25	51,17	1,92	16,94595	3,752199	49,25
30	53,58	2,38	18,12389	4,441956	51,2
35	54,5	2,83	18,93576	5,192661	51,67

Tablica 11. Rezultati proračuna za R142b pri $p_{\max} = \text{konst.}$

T_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	46,4	1,92	16,79949	4,137931	44,48
140	48,87	1,92	16,89153	3,928791	46,95
150	51,17	1,92	16,94595	3,752199	49,25
160	53,35	1,92	16,97304	3,598875	51,43
170	55,4	1,92	16,96647	3,465704	53,48

Tablica 12. Rezultati proračuna za R236ea pri $T_{\max} = \text{konst.}$

P_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	36,33	0,88	13,77716	2,422241	35,45
20	40,46	1,24	15,59381	3,064755	39,22
25	42,88	1,59	16,8627	3,708022	41,29
30	44	1,94	17,76107	4,409091	42,06
35	43,75	2,15	18,39812	4,914286	41,6

Tablica 13. Rezultati proračuna za R236ea pri $p_{\max} = \text{konst.}$

T_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	38,38	1,59	16,91883	4,142783	36,79
140	40,77	1,59	16,91126	3,899926	39,18
150	42,88	1,59	16,8627	3,708022	41,29
160	44,81	1,59	16,78512	3,548315	43,22
170	46,61	1,59	16,6852	3,411285	45,02

Tablica 14. Rezultati proračuna za R134a pri $T_{\max} = \text{konst.}$

P_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
bar	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
15	20,75	0,62	6,939704	2,987952	20,13
20	28,7	1,04	9,688945	3,623693	27,66
25	34,3	1,45	11,70289	4,227405	32,85
30	38,35	1,87	13,23417	4,876141	36,48
35	41,36	2,29	14,45271	5,53675	39,07

Tablica 15. Rezultati proračuna za R134a pri $p_{\max} = \text{konst.}$

T_{\max}	w_T	w_P	η_t	BWR	w_{neto}
°C	kJ/kg	kJ/kg	%	%	kJ/kg
130	31,58	1,45	11,73104	4,591514	30,13
140	32,96	1,45	11,72203	4,399272	31,51
150	34,3	1,45	11,70289	4,227405	32,85
160	35,56	1,45	11,65994	4,077615	34,11
170	36,82	1,45	11,61996	3,938077	35,37