

# Razvoj tehnologija geotermalnih elektana

---

Šimunović, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:346143>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**RAZVOJ TEHNOLOGIJA GEOTERMALNIH  
ELEKTRANA**

**Diplomski rad**

**Josip Šimunović**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju****Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Josip Šimunović
<b>Studij, smjer:</b>	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	D-1475, 07.10.2022.
<b>JMBAG:</b>	0165083544
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Marinko Stojkov
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Damir Šljivac
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	Heidi Adrić, univ. mag. ing. el.
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Razvoj tehnologija geotermalnih elektana
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Opisati razvoj tehnologija geotermalnih elektrana a u praktičnom dijelu dati prikaze tehnologije i izračunati njenu učinkovitost na konkretnom primjeru prve hrvatske geotermalne elektrane Velika Ciglena.
<b>Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	06.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane diplomskog rada:</b>	20.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena diplomskog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:</b>	20.09.2024.



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 20.09.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Josip Šimunović
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1475, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	5

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Razvoj tehnologija geotermalnih elektana**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
<b>2. PREGLED PODRUČJA TEMA</b> .....	<b>2</b>
<b>3. GEOTERMALNA ENERGIJA</b> .....	<b>4</b>
3.1. Geotermalne elektrane .....	7
3.2. Geotermalne elektrane na suhu paru .....	8
3.3. Geotermalne elektrane sa separiranjem pare .....	11
3.4. Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom.....	15
3.5. Geotermalne elektrane u svijetu i Hrvatskoj.....	18
3.6. Izazovi, prilike i troškovi geotermalnih elektrana .....	21
3.7. Utjecaj geotermalnih elektrana na okoliš .....	23
<b>4. SUVREMENE TEHNOLOGIJE GEOTERMALNIH ELEKTRANA</b> .....	<b>25</b>
4.1. Razina tehnološke spremnosti (TRL) geotermalnih tehnologija .....	25
4.2. Suvremeni proizvođači tehnologija geotermalnih elektrana .....	28
4.3. Specifikacije opreme vodećih tvrtki za geotermalnu opremu iznad razine zemlje.....	31
4.3.1. Geotermalne turbine .....	32
4.3.2. Generatori.....	43
4.3.3. Cijevi, izmjenjivači topline i crpke.....	46
<b>5. TEHNO-EKONOMSKI I TERMODINAMIČKI PRORAČUN STUPNJA DJELOVANJA GEOTERMALNE ELEKTRANE VELIKA 1</b> .....	<b>53</b>
5.1. Geotermalna elektrana Velika 1 .....	57
5.2. Tehno-ekonomski proračun geotermalne elektrane Velika 1 .....	59
5.3. Termodinamički stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1 .....	67
<b>6. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>71</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>72</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>74</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>75</b>

# 1. UVOD

U svijetu se stavlja ključni naglasak na razvoj i implementaciju obnovljivih izvora energije. Jedan od ključnih razloga za to je zagađenje okoliša nastalo globalnom emisijom ugljičnog dioksida, koje predstavlja opasnost samoj egzistenciji na planeti Zemlji. Uz vjetroelektrane i fotonaponske elektrane, dolazi do sve većeg zanimanja za implementaciju geotermalnih elektrana. Geotermalna energija se stvara u Zemljinoj kori i ona je vrsta toplinske energije. Zbog značajne količine geotermalne energije prisutne u Zemljinoj kori, moguće ju je smatrati neiscrpnom, a samim time se ona može svrstati u „obnovljive“ izvore energije, ali po prirodi ona to nije. Geotermalna energija ima širok spektar primjena, može se koristiti za grijanje i hlađenje, sušenje drva te u industriji, međutim diplomski rad će se temeljiti na proizvodnji električne energije. Gotovo sve vrste obnovljivih izvora energije ovise o vremenskim uvjetima, neovisnost geotermalnih elektrana o vremenskim uvjetima znatno povećava važnost geotermalnih elektrana u kontinuiranoj proizvodnji električne energije.

Ovaj diplomski rad će pružiti pregled geotermalnih elektrana, njihov način rada, potencijal geotermalne energije te njezine prednosti i nedostatke. Najviše pozornosti će se posvetiti razvoju i tehnologijama geotermalnih elektrana, pri čemu će fokus biti na binarnoj tehnologiji, tehnologiji separacije pare i tehnologiji suhe pare. Istaknuti će se princip rada, prednosti i nedostaci, te smjer u kojemu napreduje razvoj pojedine tehnologije. Također će se pružiti i uvid u investicijske troškove pojedine tehnologije geotermalne elektrane.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

Zadatak u istraživačkom dijelu diplomskog rada je opisati razvoj tehnologija geotermalnih elektrana, u praktičnome dijelu će se prikazati tehno-ekonomski proračun i termodinamički proračun stupanja djelovanja geotermalne elektrane, na konkretnom primjeru prve Hrvatske geotermalne elektrane Velika 1.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEMA

Prema autoru iz literature [1] geotermalna energija je obnovljivi izvor energije koja se proizvodi u Zemlji te se može upotrijebiti za izravno grijanje ili se pretvoriti u električnu energiju. Najveći benefiti geotermalne energije su dostupnost tijekom cijele godine (nema varijabilnosti i povremene dostupnosti) i mogućnost pronalaska na mnogim mjestima diljem svijeta. Proizvodnja električne energije iz geotermalnih izvora zahtjeva srednje do visoke temperaturne geotermalne izvore. Osim značajnog potencijala za rast i razvoj geotermalne energije prisutan je i vrlo jak ekonomski razlog za primjenu geotermalne energije. Očekuje se da će troškovi proizvodnje električne energije iz geotermalnih tehnologija postati sve konkurentniji i da će nastaviti padati do 2050. godine. Geotermalna energija doprinosi smanjenju globalnog zatopljenja, nižim operativnim troškovima i fleksibilnosti. Instalirani globalni kapacitet geotermalnih elektrana 2016. godine je iznosio 12,7 GW, a godišnja proizvodnja električne energije 80,9 TWh, što iznosi otprilike 0,3% globalne proizvodnje električne energije.

U literaturi [2] uz navedene mnogobrojne prednosti, prikazani su i mnogi izazovi s kojima se suočava razvoj geotermalne energije, čak i u regijama s izrazito bogatim i lako dostupnim resursima. Geotermalni projekti u usporedbi s drugim energetske tehnologijama imaju dulje vremenske rokove razvoja, potrebna su veća kapitalna ulaganja te je prisutan izrazito velik rizik tijekom ranih faza istraživanja. Drugi rizici se odnose na financiranje, političke i regulatorne zahtjeve, tehničku stručnost te tehnički napredak koji se odnosi i na proizvodnju električne energije i na izravno grijanje. Nestabilna cijena nafte i plina omogućuje nove prilike za daljnji razvoj geotermalne energije kao osnovu za proizvodnju električne energije. Nacionalne politike i propisi su ključni za uspješan razvoj geotermalnih projekata, no oni se izrazito razlikuju diljem svijeta.

Autor iz literature [3] navodi kako su istraživanja o utjecaju geotermalnih elektrana na okoliš vrlo oskudna. Većinski dio emisija stakleničkih plinova je  $CO_2$ , koji geotermalni fluidi prenose iz stijena rezervoara. Postoji velika varijabilnost u emisijama stakleničkih plinova zbog geoloških uvjeta te je potrebno razlikovati geotermalne projekte u vulkanskim i nevulkanskim područjima. Vulkanska područja po prirodi imaju emisije stakleničkih plinova, a upravo to dovodi do visokog ugljičnog utjecaja. Iskorištavanje zemljišta za geotermalnu energiju je u rasponu od 0,04 do 0,4  $km^2/TWh$ . Većina prikupljanja energije se obavlja pod zemljom te ograničena površina elektrane u usporedbi s visokim kapacitetom proizvodnje električne energije rezultira visokom gustoćom površinske upotrebe u usporedbi na druge konvencionalne elektrane. Faza za vrijeme bušenja i istraživanja iskorištava površinu od 4 do 8  $km^2$  (na ograničeno vrijeme od 1 do 2 godine),

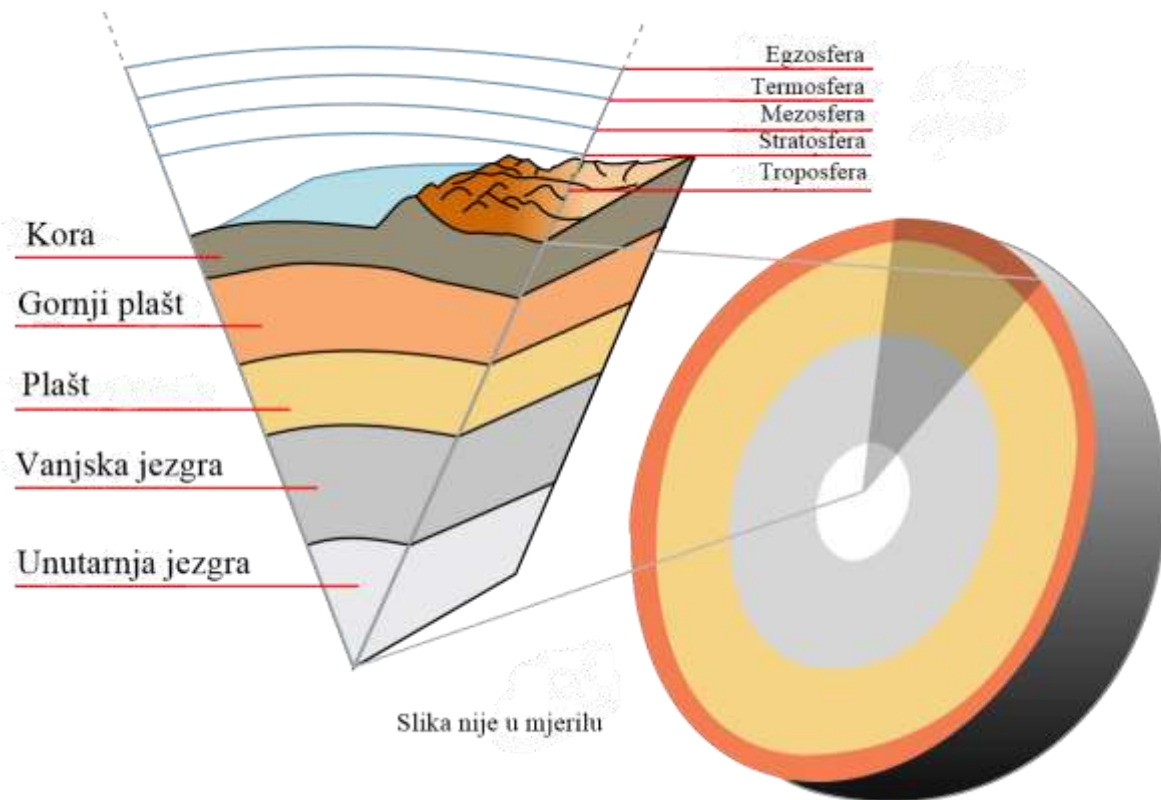
operativna faza traje od 20 do 40 godina. Velika geotermalna postrojenja upotrebljavaju podzemnu slanu vodu kao medij za prijenos topline i na taj način nema konkurencije pitkoj vodi. U sustavima grijanja voda ostaje pod zemljom, a prilikom proizvodnje geotermalne električne energije postoji potreba za rashladnim tornjevima. Za vrijeme rada postrojenja korištenje vode visoko ovisi o rashladnoj tehnologiji (uz velike varijacije među tehnologijama). Potrošnja vode varira od gotovo 0 do 14 m<sup>3</sup>/MWh, što je relativno dobar učinak. Velik dio geotermalnih elektrana nakon upotrebe ponovno ubrizgava vodu u rezervoar radi održavanja tlaka rezervoara i radi sprječavanja kontaminacija i slijeganja tla. Geotermalna energija je prihvaćena kao „čista“ i održiva, ali geotermalni razvoj može utjecati na okoliš i na ljude. Ukoliko geotermalni fluidi nisu potpuno obrađeni i zadržani kako bi se izbjegao kontakt sa zrakom mogu se pojaviti emisije stakleničkih plinova. Potencijalne emisije obuhvaćaju CO<sub>2</sub> (ugljičkov dioksid), H<sub>2</sub>S (sumporovodik), NH<sub>3</sub> (amonijak), CH<sub>4</sub> (metan), radon, hlapljive metale, karbonate, metalne sulfide...

Da bi geotermalni sustavi postali ekonomski održivi i isplativi, od ključne je važnosti razvoj inovativnih materijalnih rješenja i znatno bolje razumijevanje dugoročne interakcije između materijala i njihovog zahtjevnog okruženja (visoka temperatura i tlak, korozija, abrazija, kemijski i mehanički utjecaji te vibracije). Vrlo velik doprinos dolazi istraživanjem tvrdih materijala za svrdla, na taj im se način povećava životni vijek u abrazivnim i korozivnim uvjetima uz visoke temperature. Kako bi se omogućilo što bolje praćenje stanja u bušotini, nužno je razviti materijale za zaštitu optičkih vlakana i elektroničke opreme. Procjena toplinskog spremnika je izrazito važna kao i buduća proizvodna faza, iz tog se razloga rješava problem taloženja materijala unutar cijevi te ekstremne korozije i temperature s aspekta materijala. Neophodno je razviti korozijski otporne materijale opremljene vanjskim zaštitnim premazom i izolacijom te unutaršnjim oblogama kako bi se zaštitile cijevi, crpke, turbine, generatori i izmjenjivači topline. Inovativni polimerni, keramički ili metalni membranski dijelovi koji služe za odvajanje i ponovnu injekciju plinova omogućili bi rad postrojenja s minimalnom odnosno nultom stopom emisije ugljika. Za vrijeme rada postrojenja, ključnu ulogu ima kontinuirano praćenje sustava koje omogućuje pravovremenu intervenciju te se time smanjuje rizik od preranog kvara. Pravovremena intervencija pridonosi smanjenju vremena zastoja radi zamjene ili održavanja opreme te ekonomskim uštedama [4].



### 3. GEOTERMALNA ENERGIJA

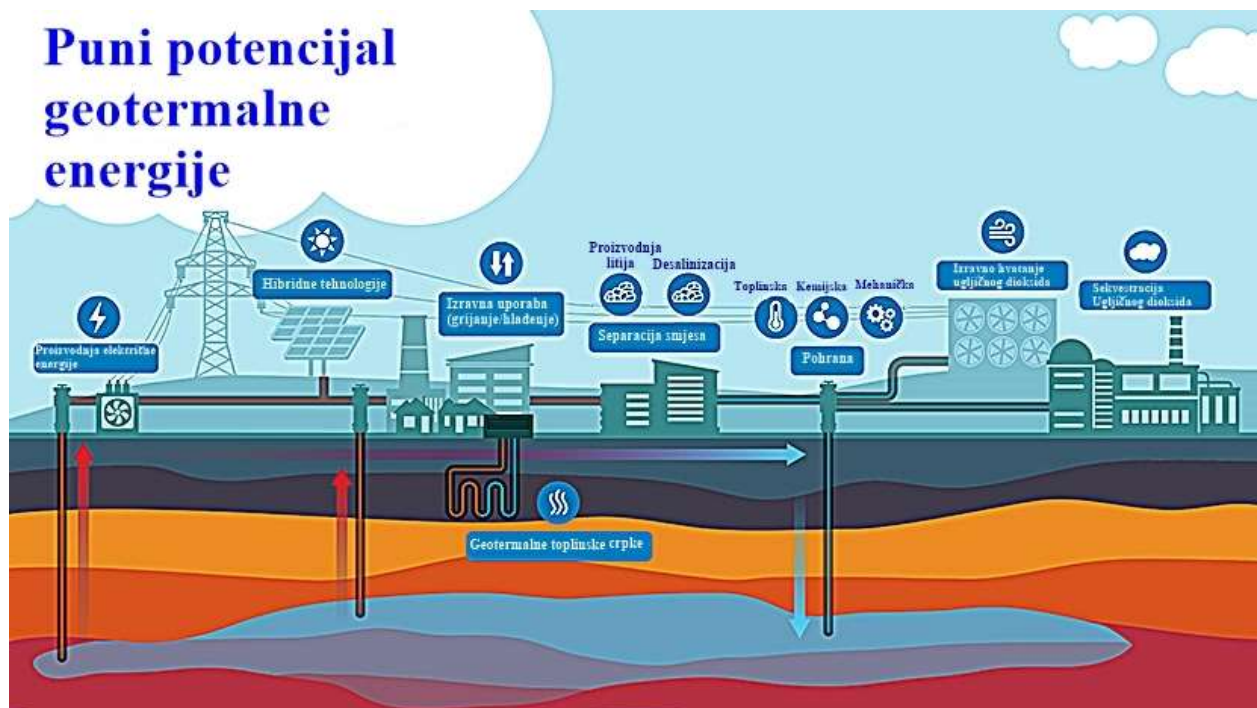
Toplinska energija unutrašnjosti Zemlje se naziva geotermalnom energijom. Toplinska energija u Zemljinoj jezgri nastaje na različite načine : laganim radioaktivnim raspadom radioaktivnih elemenata (najčešće uranij, torij i kalij) tim procesom elementi ispuštaju toplinsku energiju, gravitacijskom kompresijom pošto Zemljinu jezgru konstantno pritišću ogromne količine stijena i metala, uslijed trenja uzrokovanih pomicanjem tektonskih ploča, ostalim kemijskim reakcijama i ostacima topline nastalih pri formiranju Zemlje. Ovi procesi su zaslužni za enormnu količinu geotermalne energije koja se nalazi u Zemljinoj jezgri [5]. Na slici 3.1. prikazana je struktura Zemlje.



**Slika 3.1.** Struktura Zemlje [6]

Ispod većine Zemljine površine imamo toplinski gradijent od  $10^{\circ}\text{C}/\text{km}$  do  $60^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , što dovodi do toga da su potrebne vrlo duboke bušotine (nekoliko kilometara) kako bi se došlo do lokacija na kojima je temperatura geotermalnog spremnika oko  $100^{\circ}\text{C}$ . To bi rezultiralo s postrojenjima s vrlo niskom učinkovitosti. Kako bi se bušotina mogla smatrati isplativom i efikasnom mora imati temperaturu od  $200^{\circ}\text{C}$  do  $300^{\circ}\text{C}$  na dubini do 5km. Unatoč tome što je svaki geotermalni izvor

jedinstven i drugačiji od drugih moguće ih je grupirati na geotermalne izvore: suhe pare, vruće vode, tople vode pod visokim tlakom, vrućih suhих stijena i magme [5]. Geotermalna energija može biti iskorištena na više načina. Izravni način podrazumijeva grijanje prostora (toplice, kućanstva, industrija, poljoprivreda), korištenjem tople vode koja dolazi iz Zemljine površine. Geotermalnu energiju je moguće koristiti i za proizvodnju električne energije te za geotermalne toplinske crpke. Široki spektar potencijala geotermalne energije prikazan je na slici 3.2.. Može se koristiti za proizvodnju električne energije, hibridne tehnologije, izravno (grijanje/hlađenje), geotermalne toplinske crpke, separaciju smjesa (proizvodnja litija, desalinizacija), pohrana (mehanička, kemijska, toplinska), izravno hvatanje ugljičnog dioksida i sekvencijalnu ugljičnog dioksida.



**Slika 3.2.** Primjena geotermalne energije [7]

Potencijal geotermalne energije je izuzetno velik, oko 50000 puta je veći u odnosu na ukupnu energiju koju je moguće dobiti iz nafte i plina na globalnoj razini. Primjer geotermalne energije u prirodi su fenomeni poput vulkana, gejzira i izvora vruće vode. U nekim zemljama se koristi već tisućama godina za rekreacijsko-ljekovita kupanja. Razvoj tehnologije i znanosti proširio je primjenu geotermalne energije na proizvodnju električne energije.

Prednosti geotermalne energije su u tome što je to „zelena“ energija, nema stvaranja emisija koje bi naštetile okolišu, geotermalni resursi mogu se smatrati neiscrpnima, dimenzije geotermalnih elektrana su manje u odnosu na neke druge vrste elektrana npr., hidroelektrane. Izuzetno su

pouzdana i za razliku od drugih izvora energije nema ovisnosti o meteorološkim uvjetima i imaju relativno niske troškove proizvodnje. Nedostaci geotermalne energije su u tome što je ograničena raspoloživost lokacija i uvjeta na samoj lokaciji, rijetko je zadovoljen uvjet da su stijene dovoljno vruće na prikladnoj dubini uz lako i mekano bušenje, transport energije je ograničen i to znači da je potrebno proizvoditi električnu energiju na licu mjesta, odnosno da se koriste za opskrbu toplinom na obližnjim područjima, jer udaljenija mjesta imaju smanjenju korisnost. Postoji rizik od ispuštanja štetnih materijala i plinova iz dubine Zemlje, vodikov sulfid je vrlo opasan jer je korozivan i zahtijeva pravilno odlaganje i rukovanje [8].



**Slika 3.3.** Geotermalna polja Hrvatske [9]

Na slici 3.3. moguće je vidjeti geotermalna polja Hrvatske, te zaključiti da je u području od Bizovca do Čakovca najizrazitiji geotermalni potencijal s temperaturom od 120°C do 180°C, pa čak i preko 180°C. Ističu se još dijelovi kod Velike Gorice, Kutine, Nove Gradiške, Ernestinova i Vinkovaca. Ljubičastim kvadratima su označeni istražni prostori geotermalne vode i vidljivo je da su to Karlovač 1, Merhalovec, Legrad 1, Ljankovec-Kutnjak, Virovitica 2, Slatina 2 i 3, Ernestinovo i Babina Greda 1 i 2. Na slici se vidi da postoje i eksploatacijska polja: Geotermalno polje Zagreb, GT Ivanić, Draškovec AATG, Velika Ciglena i Bizovac.

### 3.1. Geotermalne elektrane

Proizvodnja električne energije je najzanimljiviji način pretvorbe geotermalne energije. Koriste se vrela voda i para (temperatura od 150°C do 370°C) za pokretanje turbina koje pokreću generator, te on služi za proizvodnju električne energije. Nije potrebno dodatno spaljivanje fosilnih goriva kako bi se voda zagrijala i pretvorila u vruću paru, zato se može reći da nema štetnih emisija prilikom izgaranja. Princip rada je sličan konvencionalnim termoelektranama. Tehnologije geotermalnih elektrana ovise o karakteristikama i temperaturama geotermalnih izvora zato ih se može grupirati kao:

- geotermalna elektrana s tehnologijom suhe pare
- geotermalna elektrana s tehnologijom separiranja pare
- geotermalna elektrana s tehnologijom binarnog ciklusa[5].

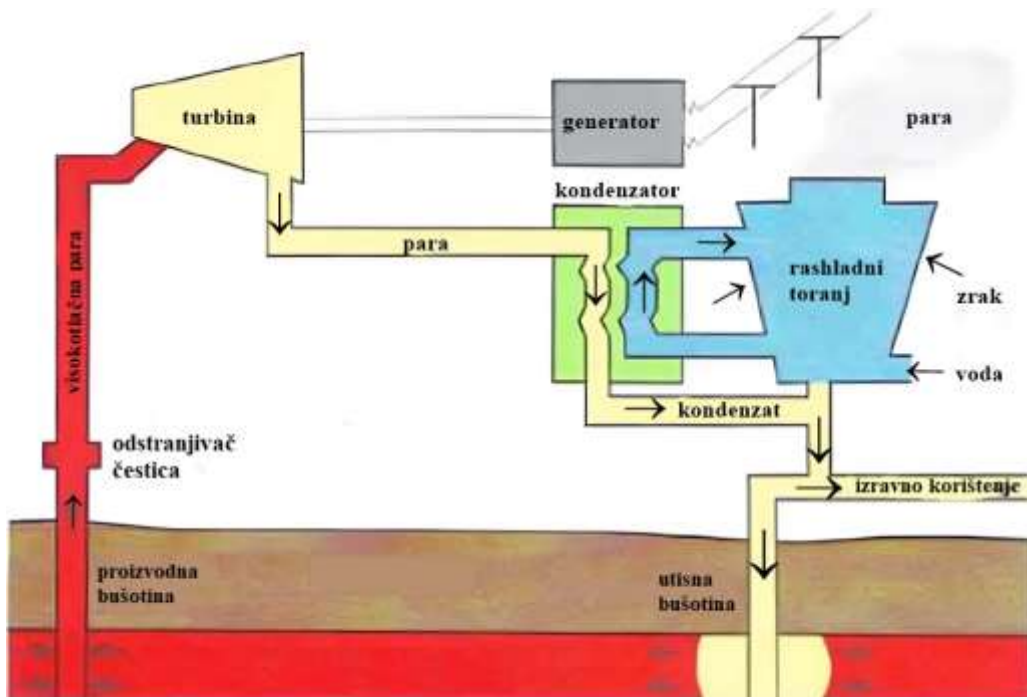
Na slici 3.4. može se vidjeti kako koja tehnologija ovisi o temperaturi geotermalnog izvora.

Temperatura ležišta	Fluid u ležištu	Primjena	Tehnologija
>220 °C (visoko temperaturna ležišta)	voda ili para	proizvodnja električne energije	parna turbina ( <i>flash steam</i> ); kombinirani ciklus (parna turbina i binarni proces); izravno korištenje fluida; izmjenjivač topline; toplinske crpke
100 °C – 200 °C (srednje temperaturna ležišta)	voda	proizvodnja električne energije, izravno korištenje	binarni proces; izravno korištenje fluida; izmjenjivač topline, toplinska crpka
50 °C – 150 °C (nisko temperaturna ležišta)	voda	izravno korištenje	izravno korištenje fluida; izmjenjivač topline; toplinska crpka

Slika 3.4. Ovisnost tehnologija o temperaturi ležišta [5]

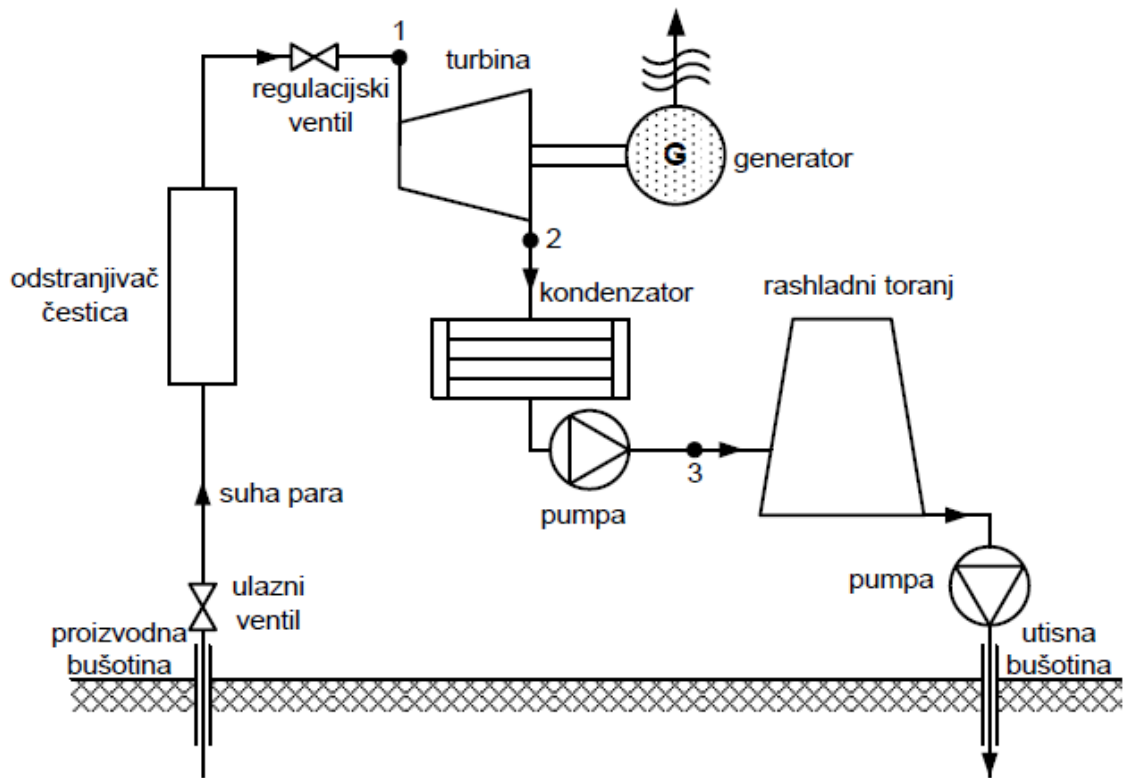
### 3.2. Geotermalne elektrane na suhu paru

Geotermalne elektrane na suhu paru ne zahtijevaju znatnu preradu pare, iz tog razloga su one ujedno najjednostavniji i najekonomičniji tip elektrana. U elektranama na suhu paru (temperature vrlo često iznad  $180^{\circ}\text{C}$ ), suha para se direktno dovodi cjevovodom iz bušotine geotermalnog izvora do elektrane, suha para se prvo usmjerava na odstranjivač čestica koji filtrira i uklanja nečistoće koje mogu trajno ugroziti parnu turbinu. Suhoj pari je potrebno regulirati tlak i protok, što se postiže pomoću regulacijskog ventila. Tada je para spremna za ulazak u turbinu. Zatim dolazi do ekspanzije pare do kondenzatorskog tlaka, koja stvara koristan rad. Upravo ekspanzija pare pogoni turbinu, a ona pokreće generator koji kreće proizvoditi električnu energiju. Kada završi ekspanzija pare, para odlazi u kondenzator gdje se odvija kondenzacija pare, nakon toga je potrebno ohladiti kondenzat u rashladnom tornju. Završna faza nakon kondenzacije pare i hlađenja kondenzata je ta da se voda od rashladnog tornja pomoću crpki istiskuje nazad u utisnu bušotinu, odnosno voda ponovno bude u geotermalnom spremniku topline. Elektrane na suhu paru predstavljaju otvoreni proces, točnije uz kondenzat je ponekad potrebno dodatno pumpati još vode [5]. Na slici 3.5. prikazana je blok shema geotermalne elektrane na suhu paru.

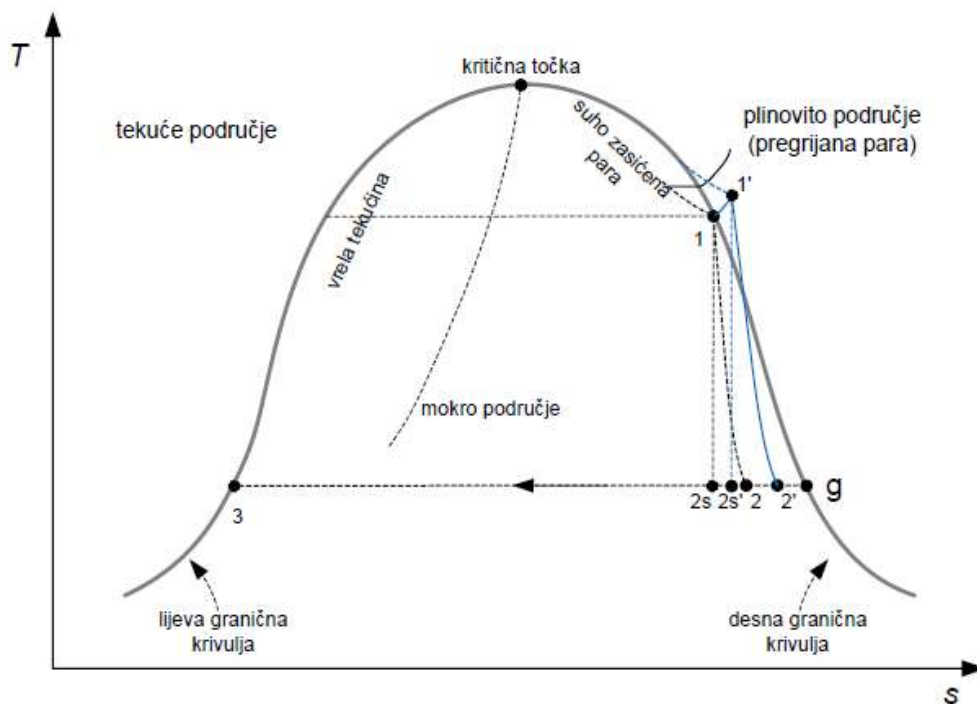


Slika 3.5. Geotermalna elektrana na suhu paru [10]

Na slici 3.6. nalazi se pojednostavljena shema elektrane na suhu paru, a slika 3.7. nam prikazuje T-s dijagram procesa koji se odvija u geotermalnoj elektrani na suhu paru.



Slika 3.6. Pojednostavljena shema geotermalne elektrane na suhu paru [5]



Slika 3.7. T-s dijagram geotermalne elektrane na suhu paru [5]

Na T-s dijagramu geotermalne elektrane na suhu paru, stanje pare na ulazu u turbinu prikazano je točkom 1, kada se radi o geotermalnom izvoru zasićene pare. Točkom 1' ako je u pitanju blago pregrijana para. Kada je u pitanju zasićena para, obavljanje korisnog rada se odvija od točke 1 do točke 2 (ekspanzija) ili od točke 1 do točke 2s (adijabatska ekspanzija), a zatim kondenzacija od točke 2 do točke 3, odnosno 2s do 3 za adijabatsku ekspanziju. Kod slučaja blago pregrijane pare, odvijanje korisnog rada je od točke 1' do točke 2' (ekspanzija) ili od točke 1' do točke 2's (adijabatska ekspanzija), kondenzacija je zatim od točke 2' do točke 3 ili od 2s' do 3 za adijabatski proces [5].

Rad koji obavlja turbina u ovisnosti je sa razlikom entalpije prije i nakon turbine. Označi li se entalpija suhe pare na ulasku (prije ekspanzije) u parnu turbinu s  $h_1$ ,  $h_1'$  je u slučaju kada se radi o pregrijanog pari. Entalpiju nakon ekspanzije odnosno na izlasku iz turbine, ako je riječ o adijabatskoj ekspanziji će se označiti sa  $h_{2s}$ , odnosno s  $h_2$ , ako se ne radi o adijabatskoj ekspanziji, tada će prema autoru iz [5] specifični rad turbine biti:

$$w_t = \Delta h_t = h_1 - h_2 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (3-1)$$

Turbina tada stvara snagu koja ovisi o specifičnom radu turbine te o protočnoj masi (količini pare) koja prođe lopaticama turbine. Iz toga je moguće odrediti snagu turbine [5]:

$$P_t = \dot{m} * \Delta h_t = \dot{m} * w_t = \dot{m} * (h_1 - h_2) \quad (3-2)$$

Snaga će se izražavati u kW u slučaju kada je protočna masa izražena u kg/s, a entalpija u kJ/kg. Ako je protočna masa izražena u t/h, a entalpija u kJ/kg, izraz snage u kW dobiva novi oblik [5]:

$$P_t = \frac{\dot{m} * \Delta h_t}{3,6} = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_2)}{3,6} \quad (3-3)$$

Kada ekspanzija nije idealna, kada nije adijabatska/izentropska tada vrijede izrazi (3-2) i (3-3), u idealnom slučaju, snaga turbine je jednaka [5]:

$$P_{ts} = \dot{m} * \Delta h_{ts} = \dot{m} * w_{ts} = \dot{m} * (h_1 - h_{2s}) \quad (3-4)$$

Također ukoliko je protočna masa izražena u kg/s i razlika entalpije u kJ/kg snaga je u kW, no ako je protočna masa izražena u t/h, a entalpija u kJ/kg, snaga u kW je izražena sljedećim izrazom [5]:

$$P_{ts} = \frac{\dot{m} * \Delta h_{ts}}{3,6} = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_{2s})}{3,6} \quad (3-5)$$

Učinkovitost turbine  $\eta_{te}$  (izentropska) je:

$$\eta_{te} = \frac{P_t}{P_{ts}} = \frac{\dot{m} * (h_1 - h_2)}{\dot{m} * (h_1 - h_{2s})} \quad (3-6)$$

Pomoću izraza (3-4) i (3-6) dobije se izraz za snagu turbine:

$$P_t = \dot{m} * (h_1 - h_{2s}) * \eta_{te} \quad (3-7)$$

Iz toga se može doći do električne snage geotermalne elektrane na suhu paru koja je jednaka:

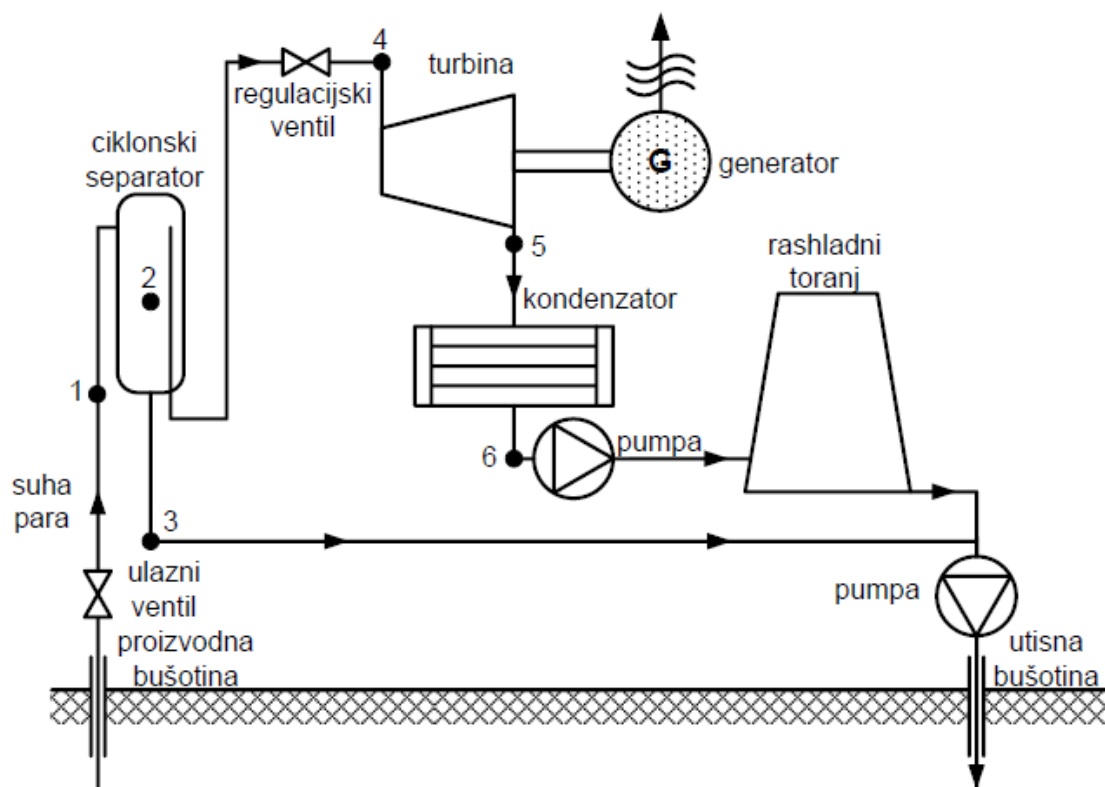
$$P_e = P_t * \eta_g = \dot{m} * (h_1 - h_{2s}) * \eta_g * \eta_{te} \quad (3-8)$$

s time da je  $\eta_g$  učinkovitost generatora [5].

### 3.3. Geotermalne elektrane sa separiranjem pare

Elektrane sa separiranjem pare su češće u odnosu na suhu paru, koriste se na ležištima gdje ima više vode, energent je voda ali pod tlakom. Voda struji od bušotine prema samoj površini, razlog tome je što je tlak bušotine niži od tlaka ležišta. Kada voda iziđe na površinu, pada tlak zraka, dolazi do vrenja i dobiva se mješavina tople vode i pare. Postoji velika koncentracija minerala (sulfati, kloridi, silicij...) u geotermalnoj vodi koja može uzrokovati zasoljenje i oštećenje cjevovoda. Upravo zbog toga je nemoguće izbjeći stvaranje otpadne vode u takvim postrojenjima, zbog toga ta voda mora biti vraćena nazad u ležište utisnom bušotinom [11]. Koristeći vlažnu paru kao medij za pogon turbine, izrazita je mogućnost oštećenja lopatica turbine, kako bi se to izbjeglo obavezan je ciklonski separator pare koji odvaja paru od vode te još jedan dodatni dio vode pretvara u vodenu paru. Zatim se sva vodena para kao u procesu sa suhom parom odvodi do parne turbine, a voda iz ciklonskog separatora i kondenzat se zajedno vraćaju u utisnu bušotinu. U odnosu na elektrane na suhu paru, elektrane sa separiranjem pare su složenije i skuplje [5]. Na slici 3.8. može se vidjeti pojednostavljena shema geotermalne elektrane sa separiranjem pare.



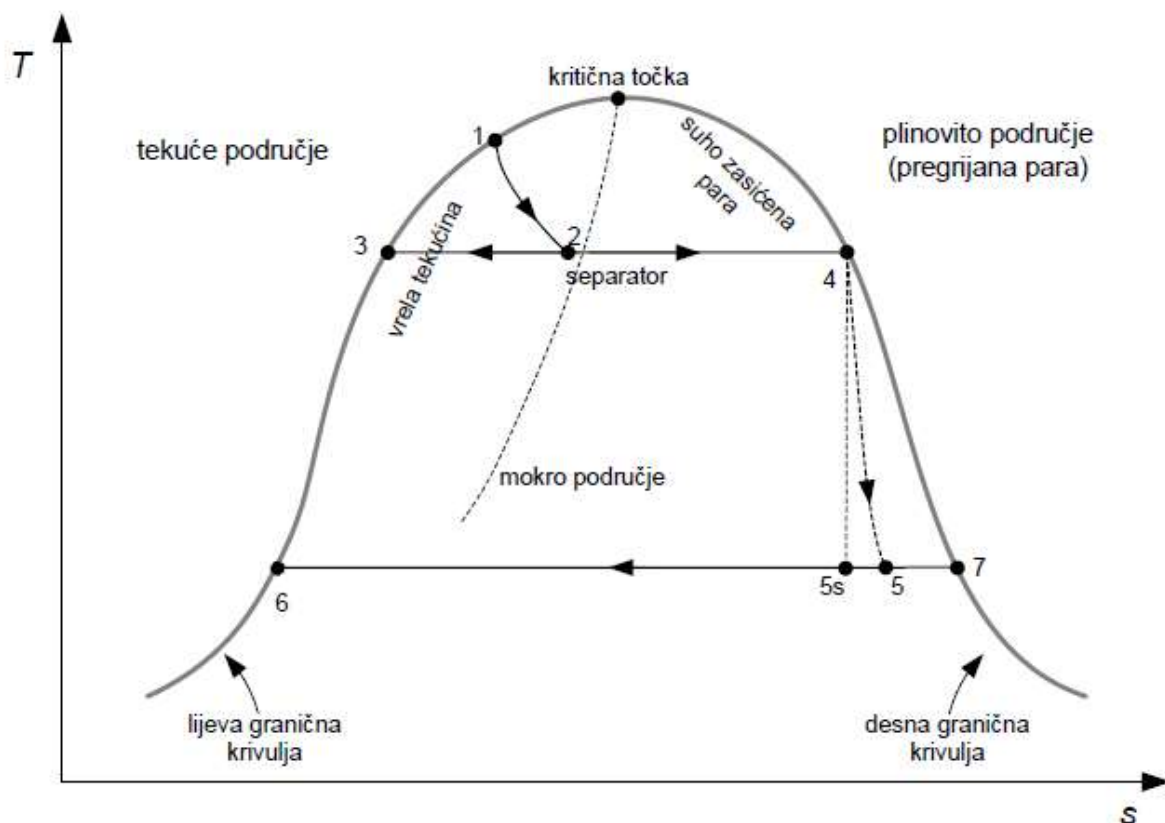


**Slika 3.8.** Geotermalna elektrana sa separiranjem pare (jedan stupanj) [5]

Nije nužan samo jedan stupanj isparavanja, odnosno ukoliko se radi o elektranama s dvostrukim stupnjem isparavanja ili o elektranama s trostrukim stupnjem isparavanja postiže se povećavanje učinkovitosti i snage elektrane, ali to podiže investicijske troškove same elektrane.

Na slici 3.9. nalazi se T-s dijagram elektrane s jednim stupnjem isparavanja. Proces koji se odvijaju su:

1. mokra para iz proizvodne bušotine
2. separacija vode i vodene pare
3. separirana voda se vraća nazad u utisnu bušotinu
4. suha para odlazi u parnu turbinu
- 4-5 odvija se ekspanzija u parnoj turbini
- 4-5s ukoliko se radi o adijabatskoj ekspanziji
- 5(5s)-6 kondenzacija vodene pare, zatim vodena para i separirana tekućina bivaju poslane nazad u utisnu bušotinu [5].



**Slika 3.9.** T-s dijagram geotermalne elektrane sa separiranjem pare [5]

Proces separiranja odnosno odvajanja pare događa se izobarno (tlak se ne mijenja), udio suhe pare koji se još i naziva kvalitetom pare mješavine  $x$ , koja odgovara točki 2 određuje se [5]:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} \quad (3-9)$$

Upravo  $x_2$  prikazuje koncentraciju pare u mješavini odnosno jedinični iznos pare koja dolazi u turbinu od separatora. Rad same turbine je jednak kao i u slučaju geotermalnih elektrana na suhu paru, te predstavlja razliku entalpije prije i poslije ekspanzije [5]:

$$w_t = \Delta h_t = h_4 - h_5 \quad (3-10)$$

Kada je riječ o idealnoj ekspanziji (adijabatskoj ili izentropskoj)  $h_5$  zamjenjuje  $h_{5s}$ . Tada snaga koju će razviti turbina izravno ovisi o specifičnom radu turbine i o koncentraciji pare koja je prošla preko lopatica turbine što predstavlja protočnu masu. U ovom primjeru tj. slučaju elektrana sa separiranjem pare, jedan dio pare prolazi kroz turbinu (od ukupne protočne mase taj udio je prikazan kao  $x_2$ ), tada je izraz za snagu turbine prikazan [5]:

$$\begin{aligned}
 P_t &= \dot{m} * \Delta h_t = x_2 * \dot{m}_{ukupno} * \Delta h_t = x_2 * \dot{m}_{ukupno} * w_t \\
 &= x_2 * \dot{m}_{ukupno} * (h_4 - h_5)
 \end{aligned}
 \tag{3-11}$$

Kao i kod suhe pare ukoliko je protočna masa iskazana u kg/s, a razlika entalpija u kJ/kg, snaga je dana u kW. Ukoliko imamo protočnu masu u t/h, a razliku entalpija u kJ/kg, kako bi se dobila snaga u kW izraz će biti [5]:

$$P_t = \frac{x_2 * \dot{m}_{ukupno} * (h_4 - h_5)}{3,6}
 \tag{3-12}$$

Ukoliko se radi o slučaju adijabatske/izentropske (idealne) ekspanzije, može se odrediti snaga koju ostvaruje turbina prema izrazu [5]:

$$P_t = \frac{x_2 * \dot{m}_{ukupno} * (h_4 - h_{5s})}{3,6}
 \tag{3-13}$$

Učinkovitost (izentropska) turbine  $\eta_{te}$  dana je izrazom [5]:

$$\eta_{te} = \frac{P_t}{P_{ts}} = \frac{(h_4 - h_5)}{(h_4 - h_{5s})}
 \tag{3-14}$$

Uzmu li se u obzir izrazi (3-12) i (3-14) dobiva se snaga turbine [5]:

$$P_t = x_2 * \dot{m}_{ukupno} * (h_4 - h_5) * \eta_{te}
 \tag{3-15}$$

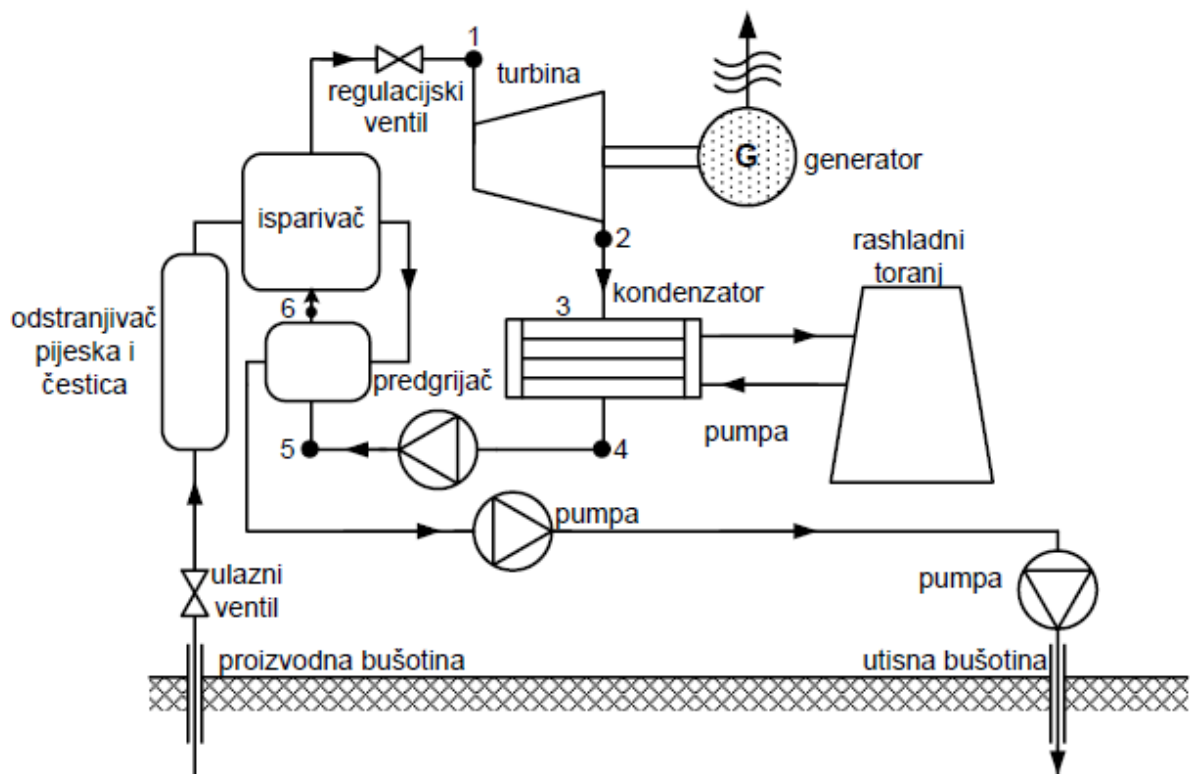
Na kraju električna snaga geotermalne elektrane sa separiranjem pare iznosi [5]:

$$P_e = P_t * \eta_g = x_2 * \dot{m}_{ukupno} * (h_4 - h_5) * \eta_{te} * \eta_g
 \tag{3-16}$$

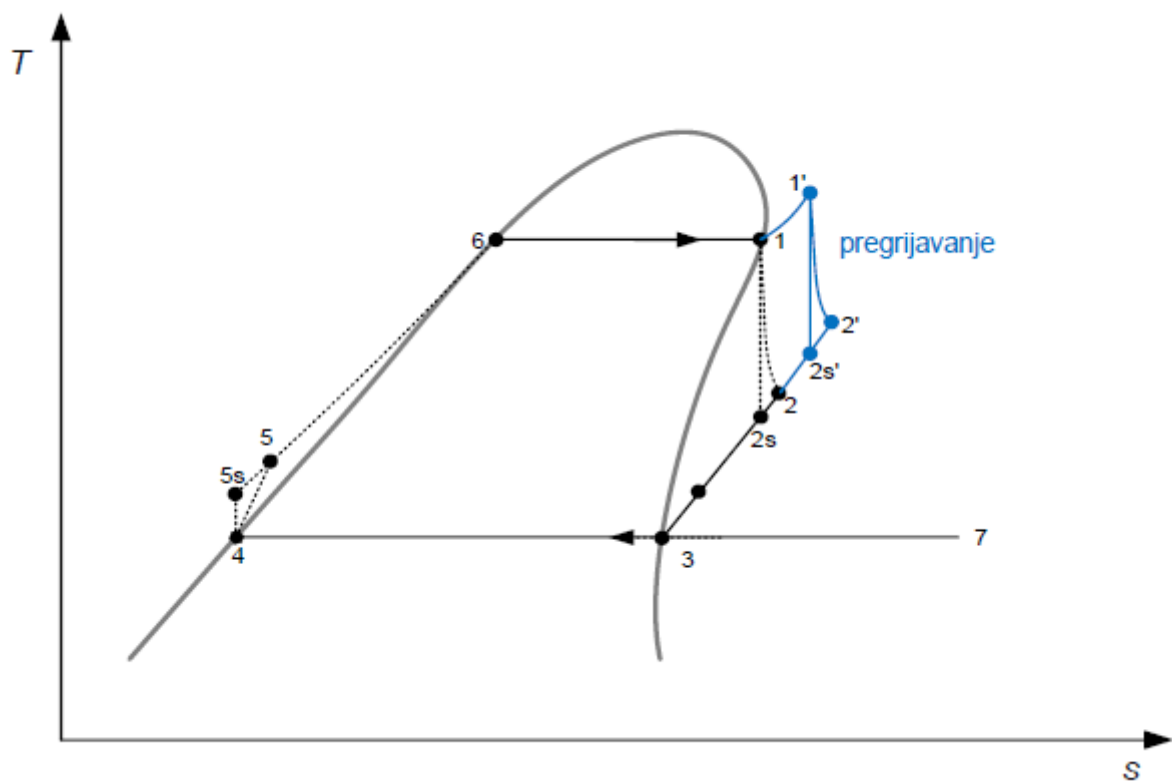
s time da je  $\eta_g$  učinkovitost električnog generatora [5].

### 3.4. Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom

Ležišta koja nemaju ostvarenu dovoljnu temperaturu za nastajanje pare koriste binarni ciklus prilikom proizvodnje električne energije. Mnoštvo geotermalnih ležišta je definirano kao nisko do srednje temperaturno odnosno temperature geotermalnog fluida su manje od 150°C. Takva temperatura bi dovela do izrazito male učinkovitosti pretvorbe geotermalnog fluida u paru, samim time ne bi bilo isplativo proizvoditi električnu energiju geotermalnim elektranama s tehnologijom suhe pare ili sa separiranjem pare. Elektrane s binarnim ciklusom znatno povećavaju učinkovitost pri korištenju takvih ležišta za generiranje električne energije. Geotermalne elektrane koje koriste binarni ciklus sadrže zatvoreni proces sekundarnog kruga, što nije slučaj u geotermalnim elektranama na suhu paru i elektranama sa separiranjem pare. Kod geotermalnih elektrana s binarnim ciklusom ključnu ulogu imaju izmjenjivači topline koji prenose toplinu (geotermalnog izvora) iz primarnog kruga radnom fluidu koji ima nisku kritičnu temperaturu, a nalazi se u sekundarnom krugu. Radni fluid pažljivo je izabran tako da ima dobra termodinamička svojstva, često su to lako hlapljivi fluidi npr. propan, amonijak, ugljikovodici, izobutan... Radni fluid prima toplinu geotermalnog fluida, dolazi do njegovog isparavanja te ekspanzije u turbini koja pokreće generator te on proizvodi električnu energiju. Nakon toga, radni fluid odlazi u kondenzator tamo se kondenzira te u tekućem stanju biva vraćen u isparivač i s time je krug zatvoren. Geotermalni fluid koji je predao toplinu biva vraćen u geotermalni izvor putem utisne bušotine. ORC (Organski Rankineov Ciklus) predstavlja proces prijenosa topline geotermalnog fluida na radni fluid (sekundarni fluid) [5]. Veća iskoristivost i efikasnost od binarnog ciklusa postignuta je korištenjem Kalina procesa. Radni fluid je zamijenjen mješavinom amonijaka i vode. Takva mješavina je temperaturno jako slična temperaturi fluida iz geotermalnog izvora. Veća iskoristivost se postiže na način da mješavina amonijaka i vode može ispariti pri različitim temperaturama, Rankineov proces isparavanje i kondenzaciju izvršava pri konstantnoj temperaturi. Upravo je to razlog veće učinkovitosti Kalina ciklusa koji dovodi toplinu pri većoj temperaturi, a odvodi toplinu pri manjoj temperaturi u odnosu na Rankinea [5]. Male snage su karakteristične za binarni ciklus, reda veličine od 1MW do 3MW.

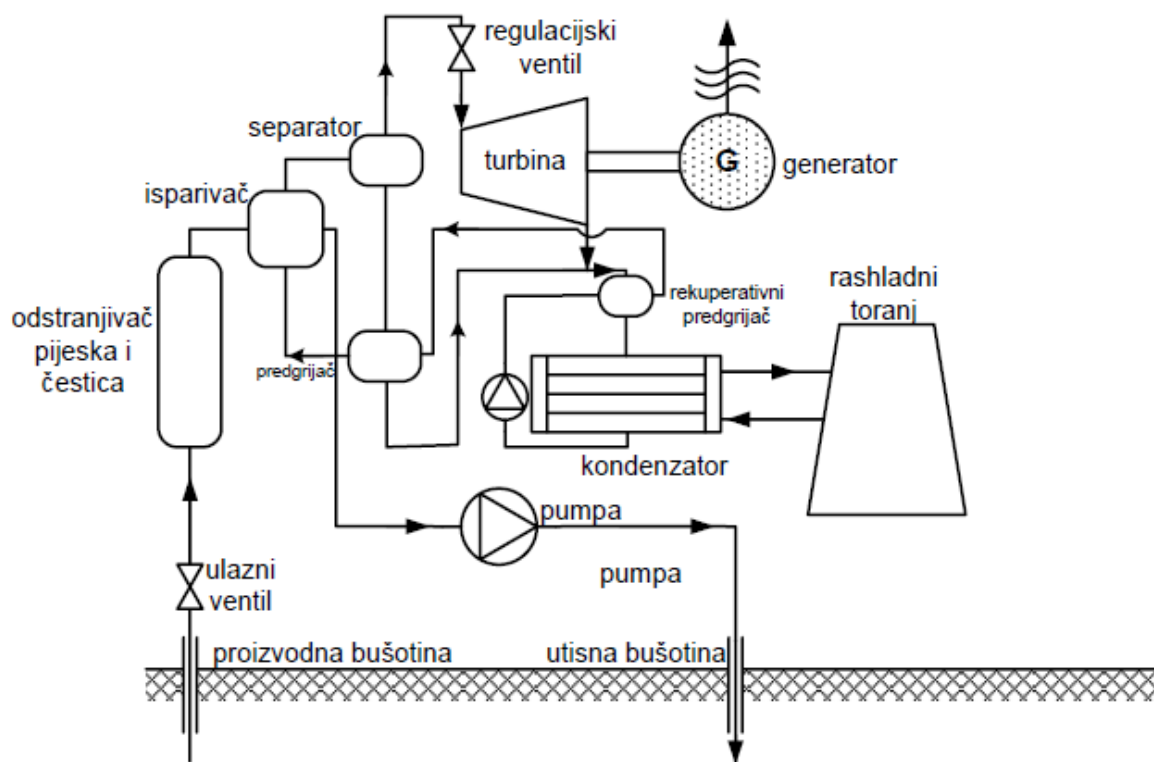


Slika 3.10. Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom (ORC) [5]



Slika 3.11. T-s dijagram geotermalne elektrane s binarnim ciklusom (ORC) [5]

Na slici 3.11. nalazi se T-s dijagram geotermalne elektrane s binarnim ciklusom (elektrana koristi Rankineov organski ciklus). U točki 1 je radni medij koji ulazi u turbinu. Nakon toga se do točke 2 odvija proces ekspanzije, ukoliko se radi o adijabatskoj ekspanziji proces se odvija do 2s, na taj način se na turbini postiže koristan rad. Ovisno o vrsti ekspanzije od točke 2 ili od točke 2s pa do točke 4 se izvršava kondenzacija radnog medija. U trenutku kada radni medij postigne tekuće stanje, crpka ga tlači i to je predstavljeno točkom 5, odnosno točkom 5s ako je u pitanju adijabatska ekspanzija. Na grafu prikazanom na slici 3.11. su označene točke 1', 2' i 2s' odnosno krivulje označene plavom bojom koje se promatraju u slučaju da se radi o pregrijanoj pari (pregrijanom radnom mediju). Proces od točke 5 (5s) do točke 6 prikazuje grijanje radnog medija, a isparavanje radnog medija koje se odvija u isparivaču je prikazano od točke 6 do točke 1 [5]. Na slici 3.12. prikazana je pojednostavljena shema geotermalne elektrane s binarnim ciklusom koja koristi Kalina ciklus.



**Slika 3.12.** Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom ( Kalina proces) [5]

Kod geotermalnih elektrana s binarnim ciklusom snaga turbine je [5]:

$$P_t = \dot{m}_{wf} * (h_1 - h_2) = \dot{m}_{wf} * (h_1 - h_{2s}) * \eta_{te} \quad (3-17)$$

pritom je:

- $\eta_{te}$  – izentropska učinkovitost turbine
- $\dot{m}_{wf}$ - zahtijevana masa radnog fluida [5].

Geotermalna elektrana s binarnim ciklusom ostvaruje električnu snagu:

$$P_e = P_t \eta_g = \dot{m}_{wf} * (h_1 - h_{2s}) * \eta_{te} * \eta_g \quad (3-18)$$

učinkovitost električnog generatora prikazana je s  $\eta_g$  [5].

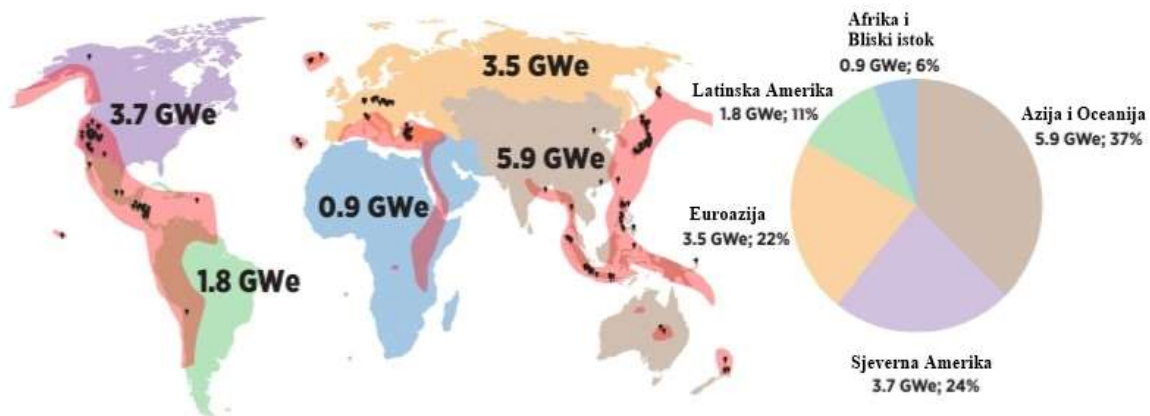
U idealnom slučaju procesa, zanemaruju se učinkovitost turbine i generatora te izraz poprima oblik [5]:

$$P_{ts} = \dot{m}_{wf} * (h_1 - h_{2s}) \quad (3-19)$$

Snaga turbine odnosno elektrane je izražena u kW, ako je protočna masa izražena u kg/s, a razlika entalpija u kJ/kg.

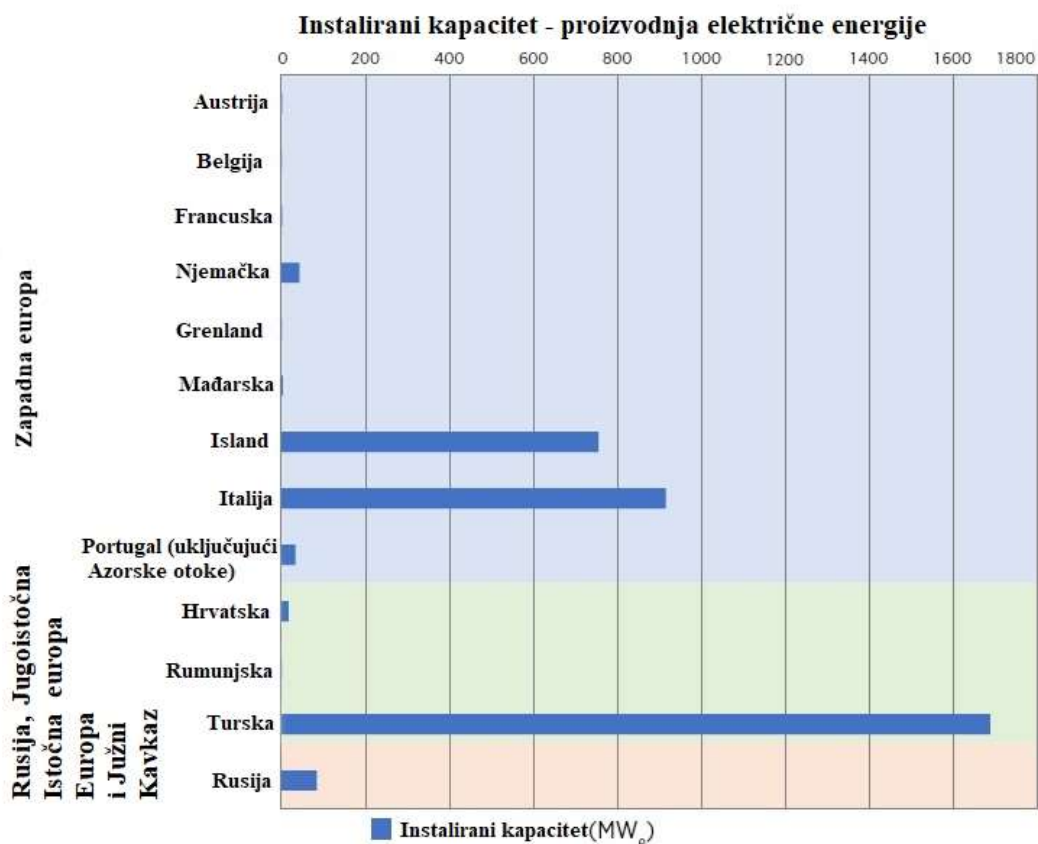
### 3.5. Geotermalne elektrane u svijetu i Hrvatskoj

Proizvodnja električne energije se u više od 30 zemalja postiže korištenjem geotermalne energije. Kapacitet koji je instaliran po zemljama kreće se od 1MW<sub>e</sub> do 3,7 GW<sub>e</sub>. Najučestalije tehnologije su upravo suha para, separiranje pare i binarni ciklus. Postoje zemlje koje pripadaju geotermalnom „klubu 1 GW“ a to su Indonezija, Filipini, Turska, Sjedinjene Američke Države i Novi Zeland te one koriste geotermalne elektrane već desetljećima. Hrvatska, uključujući i države poput Belgije, Čilea, Kolumbije, Hondurasa i Mađarske su nedavno počele koristiti geotermalnu energiju za proizvodnju električne energije te su u ranim fazama razvoja. Svjetski instalirani kapacitet za generiranje električne energije bio je 15,96 GW<sub>e</sub> na kraju 2021. godine. Najveći instalirani kapacitet ima regija Azije i Oceanije (5,9 GW<sub>e</sub>). Na slici 3.13. vidljivo je da Aziju i Oceaniju redom prate: Sjeverna Amerika (3,7 GW<sub>e</sub>), Euroazija (3,5GW<sub>e</sub>), Latinska Amerika (1,8 GW<sub>e</sub>) i naposljetku Afrika i Bliski istok (0,9 GW<sub>e</sub>) [2].



Slika 3.13. Raspodjela instaliranog kapaciteta geotermalnih elektrana po regijama [2]

Instalirani kapacitet nije nužan za sami uspjeh razvoja geotermalne energije, već se u obzir uzimaju i drugi utjecaji, npr. koliko ta geotermalna energija doprinosi u ukupnoj nacionalnoj proizvodnji električne energije. U nekim zemljama gdje je limitirano tržište samom električnom energijom (Island, Srednja Amerika, Azorski otoci) instaliranim kapacitetom od stotinjak  $MW_e$  uspješno je zadovoljena nacionalna potražnja električne energije.



Slika 3.14. Instalirani kapacitet za proizvodnju električne energije u Euroaziji [2]



Euroazija ima instalirani geotermalni kapacitet od 3,54 GW<sub>e</sub>, to je udio od otprilike 22% svjetskog instaliranog geotermalnog kapaciteta za proizvodnju električne energije. Globalni porast instaliranog geotermalnog kapaciteta za proizvodnju električne energije u zadnjih 20 godina bio je 3,2% dok je u Euroaziji rast bio brži 5,2%. U Turskoj je instalirani kapacitet porastao sa 91 MW<sub>e</sub> (2010. godine) na 397 MW<sub>e</sub>(2015. godine) pa sve do 1.688 MW<sub>e</sub>(2020. godina) [2]. Pogleda li se slika 3.13. može se zaključiti da je Turska veliki lider u Euroaziji, iza nje se nalaze Italija, Island, Rusija, Njemačka i dr. Jedina geotermalna elektrana u Hrvatskoj je Velika 1, u Cigleni koja se nalazi kraj Bjelovara. Otvorena je 2019. godine instaliranog kapaciteta 16,5 MW. Velika 1 je najveća elektrana u ovom dijelu Europe s binarnom tehnologijom i ona opskrbljuje gotovo čitav Bjelovar električnom energijom. Geotermalna energija je sve više zastupljena, iako tempo rasta nije dovoljno brz, razvoj tehnologija će pridonijeti samoj implementaciji geotermalnih elektrana.

**Tablica 3.1.** Zemlje s najvećim instaliranim kapacitetom za proizvodnju električne energije [12]

<b>ZEMLJA</b>	<b>INSTALIRANI KAPACITET [MW<sub>e</sub>]</b>
Sjedinjene Američke Države	3900
Indonezija	2418
Filipini	1952
Turska	1691
Novi Zeland	1042
Kenija	985
Meksiko	976

Tablicom 3.1. su prikazane zemlje „lideri“ u instaliranom kapacitetu za geotermalnu proizvodnju električne energije. Može se primijetiti da je SAD u znatnoj prednosti nad svima u iskorištavanju geotermalne energije za proizvodnju električne energije.

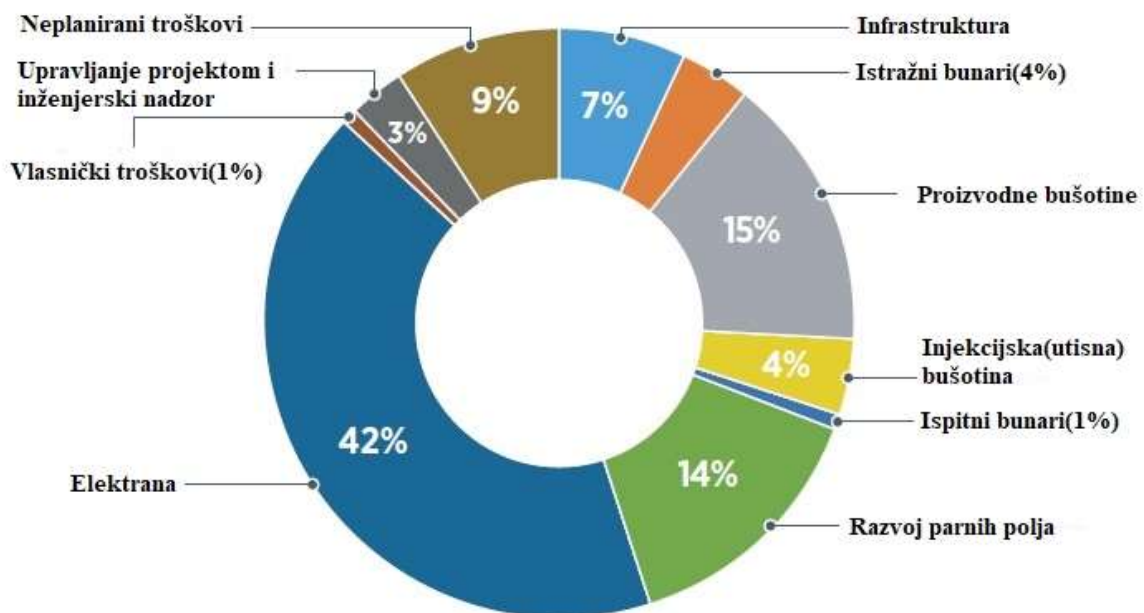
### **3.6. Izazovi, prilike i troškovi geotermalnih elektrana**

Postoje mnogi izazovi koji ometaju razvoj, rast na tržištu te implementaciju projekata geotermalnih elektrana. Većina izazova se javlja pri samom istraživanju područja i njegovih karakteristika, no i u daljnjim fazama razvoja projekta postoje mnogi rizici. Vrlo čest izazov s kojim se susreću geotermalni projekti su otpor lokalnog stanovništva i društvenih organizacija. Taj otpor je prisutan iz razloga nedovoljne informiranosti o geotermalnoj tehnologiji, različitih interesa za iskorištavanje zemljišta, straha od mogućih društvenih i okolišnih posljedica (onečišćenje prirode i vode, problemi sa zdravljem, emisije plinova...) Zbog znatnih investicijskih rizika i kompleksnosti projekta geotermalni projekti imaju poteškoće s financiranjem i ranim istraživanjem. Zbog nedovoljne političke podrške neki projekti jednostavno nisu profitabilni, bez boljih tržišnih uvjeta i javne podrške profitabilnost će biti mala. Ukoliko postoji želja za privlačenjem investitora nužno će biti napredovanje regulativnih okvira. Male i nekonkurentne cijene električne energije usporile su napredak rasta geotermalne industrije na nekim područjima. Zemlje u kojima je geotermalna industrija prisutna još razvijaju svoje političke, tehničke i administrativne kapacitete. Dodatni razvoj tehnologija je ključan u povećanju učinkovitosti te za globalno prihvaćanje geotermalne energije kao energetskog rješenja. Svaka regija ili zemlja ima svoje jedinstvene izazove i probleme s kojima se susreću pri razradi geotermalnih projekata [2].

Unatoč brojnim izazovima, postoje i znatne prilike koje mogu pomoći u savladavanju svih izazova i prepreka kako bi geotermalna energija postigla rast na tržištu. Povezivanje i proširenje regionalnih mreža predstavlja veliku priliku za razvoj geotermalnih izvora. Integrirano planiranje proizvodnje geotermalne električne energije s povezivanjem na regionalne mreže pruža veći razvoj geotermalnih projekata u regijama koje imaju velik potencijal s mogućnošću isporuke električne energije u zemlje s nižim potencijalom. Služiti se znanjima i tehnologijama iz nafte i plina. Industrija ugljikovodika prepoznala je prilike u geotermalnoj tehnologiji koje bi omogućile korištenje tehnologija, podataka, vještine i financijske resurse nafte i plina u podržavanju tranzicije prema čistoj energiji. Kako je rasla potražnja za zamjenom fosilnih goriva s obnovljivim izvorima čiste energije, industrije nafte i plina su sve više pokušale tražiti prilike u razvoju geotermalnih projekata. Pomoću njihovih iskustava i tehnologija moglo bi se znatno napredovati u razvoju geotermalnih resursa u dubokim bazenima. Također se nude prilike u korištenju minerala iz geotermalnih fluida i soli, te mogućnost veće suradnje i sinergije s zelenim vodikom [2].

Investicijski troškovi prilikom izgradnje geotermalnih elektrana su prilično visoki, ali troškovi tijekom rada su veoma niski i predvidivi. Širok je spektar troškova koji obuhvaćaju geotermalne elektrane, od troškova istraživanja i procjene resursa u što spadaju: istražna bušenja, bušenje

proizvodnih i injekcijskih bunara, infrastruktura polja, sustavi za prikupljanje i zbrinjavanje geotermalnih fluida, do površinskih instalacija, troškovi same elektrane i s njom povezani troškovi, razvojne troškove projekta i također troškove povezivanja na mrežu. Cjelokupni troškovi najviše ovise o: samom tipu elektrane (suha para, separiranje pare i binarni ciklus), broju odnosno produktivnosti bunara te drugim karakteristikama samog geotermalnog izvora. Na globalnoj razini troškovi instalacije variraju između 1.753,97 €/kW do 4.736,65 €/kW, naravno najveći utjecaj na sami trošak ima lokacija. Ukoliko se žele instalirati dodatni kapaciteti na mjestima gdje su polja postojana troškovi su manji, ukoliko se radi o zahtjevnim i izazovnim lokacijama troškovi će biti znatno veći. Na kraju se može zaključiti da su troškovi tehnologije binarnih elektrana zbog svoje složenosti veći u odnosu na tehnologiju suhe pare i tehnologiju separacije pare [1].



**Slika 3.15.** Postotna raspodjela troškova elektrane 110MW u Indoneziji [1]

Iz slike 3.15. vidljivo je da najmanji postotak troškova su vlasnički troškovi (1%) i ispitni bunari (1%), zatim ide upravljanje projektom i inženjerski nadzor (3%), utisna bušotina (4%) i istražni bunari (4%), infrastruktura (7%), velik udio u ovome su zapravo neplanirani troškovi (9%), razvoj parnih polja (14%), proizvodne bušotine (15%) i elektrane (42%). Poboljšanje ekonomije geotermalnih elektrana moglo bi se postići boljom upotrebom nusproizvoda nastalih u geotermalnim elektranama (toplina, silicij ili ugljični dioksid) [1].

### 3.7. Utjecaj geotermalnih elektrana na okoliš

Princip rada geotermalnih elektrana gotovo je identičan termoelektranama, značajna je razlika u dobivanju topline. Za dobivanje topline u termoelektranama potrebna je neka vrsta goriva npr. nafta, plin ili ulje, prilikom njihovog izgaranja dolazi do emisije štetnih plinova. U slučaju geotermalne elektrane nema procesa izgaranja i samim time nema štetne emisije plinova. No iako je geotermalna energija „čista“ i kod nje dolazi do emisije plinova i to najviše u proizvodnim bušotinama. Kada se toplina dovodi iz geotermalnog izvora tj. spremnika topline do površine, moguće su emisije štetnih plinova uglavnom su to:  $CO_2$  (ugljičkov dioksid),  $H_2S$  (vodikov sulfid), sumporov dioksid  $SO_2$  i dr. Svakako emisije štetnih plinova u odnosu na konvencionalne elektrane su zanemarive. Najmanju emisiju štetnih plinova imaju elektrane s binarnim ciklusom zato što se fluid nakon što je predao toplinu, odmah utiskuje i vraća nazad kroz utisnu bušotinu. Geotermalni fluidi su bogati mineralima. Najvećoj emisiji otpadnih voda uzrok je zapravo iskorišteni geotermalni fluid. Pomoću utisnih pumpi moguće je smanjiti količine otpadnih voda. Neke emisije otpadnih voda se javljaju kod bušenja i testiranja bušotina. Ovisno o ležištu, bušotini i lokaciji mijenja se sam sastav geotermalne vode. U sastavu prevladavaju kloridi natrija, kalija i kalcija. Iznimno je važno postići da se geotermalna voda ne promiješa s podzemnim vodama. Kada bi ispuštanje geotermalne vode bilo nekontrolirano, došlo bi do izrazitog zagađenja okoliša, površinskih i podzemnih voda. Najčešće se vode nakon neutralizacije odvede u pojedine jame, odnosno još se jednom pročiste ukoliko se vraćaju u sami proces [5].

Kada je riječ o zemljištu važno je da se što manji koristan dio zemljišta upotrebljava u radu geotermalne elektrane. Većinom su geotermalne elektrane izgrađene na samoj lokaciji geotermalnog izvora, jer pad tlaka i temperature direktno uzrokuje transport energije. Pad tlaka i temperature kao posljedicu može imati i propadanje tla ukoliko se radi o izvlačenju geotermalnog fluida. Rješenje za pad tlaka je ponovno utiskivanje fluida u utisnu bušotinu. Mjesta s najvećim potencijalom za geotermalnu energiju su tektonski aktivna područja i nije moguće garantirati da li utiskivanje vode utječe na manje potrese i samo propadanje tla. Kod elektrana sa suhom parom propadanje tla nije toliko učestalo a razlog tome je što su stijene čvrste i samonosive, a suha para se nalazi između njih i popunjava prostor.

Geotermalne elektrane ispuštaju značajnu količinu topline u okoliš, zato je prihvatljiva opcija da se uz samu elektranu postavi i neko postrojenje koje tu toplinu može iskoristiti, npr. staklenici. Uzročnici ispuštanja topline su rashladni tornjevi, ali i kondenzatori. Ukoliko se geotermalna

elektrana nije sagradila na samom ležištu moguća je emisija i oko cijevi koje služe za transport geotermalnog fluida.

U svim fazama je prisutna buka kod geotermalnih elektrana, ali prevladava kada je u pitanju izgradnja same bušotine, odnosno elektrane. Buka najčešće dolazi od turbina, redukcijskih ventila, generatora, transformatora i velikih ventilatora rashladnih tornjeva. Naravno, kada se geotermalna elektrana pusti u rad buka mora biti unutar dozvoljenih granica [5].



**Slika 3.16.** Geotermalna elektrana Velika 1 [13]

## **4. SUVREMENE TEHNOLOGIJE GEOTERMALNIH ELEKTRANA**

Ukoliko se radi o zdravoj i komercijalno dokazanoj tehnologiji riječ je o geotermalnoj energiji. Geotermalna energija je sposobna održavati malu cijenu električne energije s velikim kapacitetom u usporedbi s drugim obnovljivim izvorima energije. Neki noviji geotermalni resursi pod koje se podrazumijevaju poboljšani geotermalni izvori ili vruće stijene nisu u dovoljnoj mjeri istraženi i razvijeni. Iz tog razloga pojavljuju se veći troškovi, jer su potrebna bušenja na veliku dubinu i dodatne mjere. Kao pomoć u tome izazovu stoji simbioza s klasičnim tehnologijama bušenja za naftu i plin, jer se u bušenju koristi gotovo identična oprema. Razvojem tehnologije istraživanja i korištenjem najboljih praksi, dolazi do povećanja uspjeha u proizvodnim bušotinama na globalnoj razini [3]. U ovom dijelu će biti opisana trenutna razina tehnološke spremnosti, neki od najpoznatijih proizvođača opreme za geotermalnu energiju te njihove specifikacije, problemi s kojima se susreću sami razvojni inženjeri i buduće strategije koje se planiraju provesti.

### **4.1. Razina tehnološke spremnosti (TRL) geotermalnih tehnologija**

Prioriteti za istraživanje, razvoj i inovacije u okviru Implementacijskog plana duboke geotermalne energije SET-ovog plana i trenutna razina tehnološke spremnosti prikazane su u tablici 4.1. Vidljivo je da je razina tehnološke spremnosti (TRL) geotermalnih tehnologija u tablici iskazana brojevima od 1 do 7, postoji sveukupno 9 TRL razina. Ukoliko se radi o TRL 1, tek započinju konceptualna ili početna istraživanja, bez ikakvih eksperimentalnih dokaza. TRL 2 se odvija u slučaju kada su proučeni osnovni principi odnosno praktične primjene mogu biti primijenjene na početne spoznaje te su koncept i primjena formulirani. TRL 3 je razina u kojoj se dešavaju aktivna istraživanja i dizajn, često tijekom TRL 3 razine se izrađuje model koncepta, te taj koncept biva potvrđen u laboratorijskim okruženjima. Kada je tehnologija spremna za dokazivanje osnovnih principa neke tehnologije radi se o TRL 4, ispituje se više komponentnih dijelova zajedno, to je prototip niske razine. TRL 5 se nadovezuje na TRL 4, ali tehnologija mora zadovoljiti zahtjevnija ispitivanja. U ovom slučaju simulacije moraju biti pokrenute u okruženjima koja su bliska stvarnosti, u planiranom okruženju. TRL 6 je prototip visoke razine i označava potpuno funkcionalni model koji ga predstavlja, performanse su blizu očekivanima. TRL 7 tehnologija je zapravo radni model, odnosno prototip je blizu ili je na planiranoj razini operativnog sustava. TRL 8 predstavlja kraj istinskog razvoja sustava i proizvodni problemi bivaju riješeni, tehnologija je testirana i spremna je za implementaciju u tehnološki sustav. Kada je tehnologija dokazana i uspješno su odrađeni svi zadatci radi se o razini TRL 9, te je postignuta potpuna komercijalna

primjena [14]. TRL razine od 1 do 4 provode se u istraživačkom laboratoriju, TRL 5 i 6 su zapravo demonstracijske primjene na visokom stupnju razvoja, a TRL razine 7, 8 i 9 se odnose na potpuno razvijene i unaprijeđene tehnologije. U tablici 4.1. se također nalazi i n/a koji označava da određeni podatak nije dostupan.

**Tablica 4.1.** Razina tehnološke spremnosti TRL (2022. godine) [3]

Prioritet	TRL (2022)
<b>Geotermalna toplina u urbanim područjima</b>	7
Integracija geotermalne električne energije, grijanja i hlađenja u odgovarajući energetski sustav koji odgovara zahtjevima mreže	4-5
Poboljšavanje ukupne učinkovitosti pretvorbe geotermalne energije za proizvodnju električne energije, grijanja i hlađenja	5-6
Elektrane i postrojenja za grijanje i hlađenje zatvorenog kruga integrirane u kružno gospodarstvo	5-6
Održive i učinkovite proizvodne tehnologije	4
Razvoj i eksploatacija geotermalnih resursa u širem rasponu geoloških postavki	4
Napredne tehnike bušenja i samog dovršavanja bušotina	4-5
Inovativne tehnike istraživanja za procjenu resursa i definiranje ciljeva bušenja	5-6
Povećanje svijesti lokalnih zajednica i uključivanje dionika u održiva geotermalna rješenja	n/a
Smanjenje rizika (projektnog i financijskog)	n/a

Iz tablice 4.1. se vidi da je najveći prioritet bila geotermalna toplina u urbanim područjima s TRL 7 razinom. Geotermalnu toplinu u urbanim područjima maksimalno se iskorištava za grijanje i hlađenje gradskih područja. Zaključuje se da je većina ključnih sustava funkcionalna i da je uspješno implementirana u operativno okruženje s relevantnim uvjetima. Sama integracija geotermalne električne energije za grijanje i hlađenje koja mora udovoljiti zahtjevima mreže je razvijena između TRL 4 i TRL 5 razine. Ova tehnologija može pružiti rješenje u varijabilnoj potražnji za električnom energijom i toplinskom energijom te povećati stabilnost samog elektroenergetskog sustava. Poboljšavanje ukupne učinkovitosti pretvorbe geotermalne energije je na visokoj razini između razine TRL 5 i TRL 6. Velika pozornost se daje poboljšavanju učinkovitosti najviše iz ekonomskih razloga, s obzirom da s većom učinkovitosti gubici bivaju sve manji, odnosno ekonomska dobit bude sve veća. Iz ekoloških razloga došlo je i do velikog razvoja

tehnologije elektrana i postrojenja za grijanje i hlađenje zatvorenog kruga integriranih u kružna gospodarstva. Kružno gospodarstvo je oblik proizvodnje i potrošnje u kojima se resursi dijele, posuđuju, koriste više puta, popravljaju (odnosno obnavljaju) i recikliraju u što više iteracija kako bi se sama količina otpada smanjila. Ova tehnologija pruža smanjivanje otpada na minimalne razine te učinkovito korištenje dostupnih resursa. Maksimizira se vrijednost samog resursa te se smanjuje negativan utjecaj na okoliš.

TRL 4 razinu je postigao prioritet održivih i učinkovitih proizvodnih tehnologija. Pokušavaju se ostvariti inovativne tehnologije koje će biti tehnički dugoročno održive, ekološki prihvatljive i maksimalno učinkovite. Na istoj razini je razvoj i eksploatacija geotermalnih resursa u širem rasponu geoloških postavki, to zapravo naznačuje da je svrha ove tehnologije širenje područja na kojima se geotermalna energija može eksploatirati, uzimajući u obzir i područja koja trenutno nisu dovoljno istražena ili su bila vrlo izazovna za eksploataciju korištenjem trenutnih tehnologija.

Između TRL 4 i 5 razine nalaze se napredne tehnike bušenja i samog dovršavanja bušotina koje su vrlo važne kako bi se moglo ostvariti eksploatacije na izazovnijim područjima koja trenutno nisu mogla biti izvršena zbog nedovoljno dobre opreme. Na ovaj način se teži optimiziranju performansi samih bušotina, skraćivanju vremena izgradnje i troškova te smanjivanju negativnih posljedica i rizika za okoliš. Na iznimno visokoj tehnološkoj spremnosti između TRL 5 i 6 razine se nalaze inovativne tehnike istraživanja za procjenu resursa i definiranje ciljeva bušenja. Zaključuje se da je cilj ove tehnike smanjiti rizik i troškove, te određivanje optimalnih lokacija geotermalnih resursa gdje će se odvijati bušenje. Na taj način omogućuje se bolji razvoj geotermalnih projekata i maksimalno korištenje geotermalnih resursa koji su raspoloživi. Prioriteti za koje nisu dostupni podaci su povećavanje svijesti lokalnih zajednica i uključivanje dionika u održiva geotermalna rješenja te smanjenje rizika. Iako podaci nisu dostupni ovo su dva izuzetno bitna prioriteta. Povećavanje svijesti lokalnih zajednica i uključivanje dionika pridonose tome da se postigne društvena prihvatljivost i sam uspjeh geotermalnih projekata. Način na koji se to može ostvariti je da se omogući lokalno educiranje o geotermalnoj energiji, otvorena komunikacija te informiranje o planovima. Tako se stvaraju partnerski odnosi, točnije može se omogućiti razvoj geotermalne energije u lokalnim zajednicama. Ublažavanje rizika neovisno radi li se o financijskim ili projektnim rizicima mora biti od ključne važnosti, ono je zapravo ključ za uspjeh projekta te smanjenje svih rizika, negativnih utjecaja i sličnih problema. Kroz ovaj prioritet bi se uspjela razviti stabilnost, dugoročnost i uspjeh geotermalnih projekata.



## 4.2. Suvremeni proizvođači tehnologija geotermalnih elektrana

Većina troškova geotermalnih projekata bazirana je na proizvodnji bušotina i izgradnji postrojenja geotermalne elektrane. Na svjetskoj razini postoji mali broj kvalificiranih tvrtki za geotermalno bušenje. Bušenje za naftu, plin i geotermalne izvore izvodi tek oko 20 tvrtki. Može se zaključiti da sama EU nije posvetila dovoljno pažnje i resursa u usluge bušenja i istraživanja izvora. Kada se radi o pothvatima iznad zemlje, najčešće se radi o tehnologiji binarnog organskog Rankineovog ciklusa (binarna tehnologija) koja se koristi u većini geotermalnih instalacija na razini Europske unije. Fokus je stavljen na turbine, generatore, izmjenjivače topline, potopne crpke i rashladne tornjeve. Mnoga izvješća su dokazala da tržište turbina za geotermalne elektrane predvode velike korporacije koje nisu bazirane samo na geotermalnoj energiji već i u drugim energetske sektorima. Toshiba, Fuji Electric, Mitsubishi Heavy Industries i Ormat Technologies su četiri glavna proizvođača te obuhvaćaju 80% instaliranog kapaciteta turbina. Ansaldo Energia je najbolja europska tvrtka smještena u Italiji i nalazi se na petom mjestu glavnih proizvođača turbina.

Vodeći proizvođači organskih Rankineovih ciklusa (ORC) su Ormat (SAD), Turboden (Italija), Atlas Copco (Švedska) i Exergy (Italija) svi od njih su vrlo aktivni na području Turske i Portugala. Fuji je svoj fokus postavio na Island, dok je Toshiba najviše zastupljena u Turskoj kao dobavljač flash turbina. Azijski proizvođač, točnije Kineska tvrtka Kaishan je proširila svoje djelovanje i na Europu, plasiranjem ORC turbo-generator geotermalnoj elektrani u Mađarskoj. Kada je u pitanju tržište za izgradnju geotermalnih postrojenja tržište je poprilično konkurentno. Većinom su u pitanju javne odnosno nacionalne tvrtke kao što su KenGen u Keniji i CFE u Meksiku. Unatoč tome, postoje i privatni operateri koji su dovoljno veliki npr. Calpine, Terra-Gen, Ormat koji imaju sjedište u SAD-u. Uzme li se u obzir Europa ENEL je najpoznatija firma koja ima sjedište u Italiji.

Ako je u pitanju toplina, sustav daljinskog grijanja je najveća i najbrže rastuća upotreba geotermalne energije u Europskoj uniji, tehnologije koje se koriste su slične geotermalnim elektranama, jedino što se dostupna toplina iskorištava na druge načine. Za geotermalna opremu koja se koristi za instalacije na razini ispod zemlje, tvrtke odnosno dobavljači bivaju većinom iz naftne i plinske industrije. Oprema iz plinske i naftne industrije najčešće služi za istraživanje, bušenje, cijevi i crpke. Najveće tvrtke i dobavljači za sustave za upravljanje, crpke i ventile su Schlumberger, Baker & Hughes, GE, ITT/Goulds, Halliburton, Weatherford International, Flowserve ove sve tvrtke imaju sjedište u SAD-u, Canadian Advanced ESP (Kanada) i Borets (Rusija). Alfa Laval (Švedska), Danfoss (Danska), Kelvion Holdings (Njemačka), SPX Corporation (SAD), Xylem (SAD), Hamon & Cie, Modine Manufacturing Company (SAD) i

SWEP International (Danska) su tvrtke koje su vodeći dobavljači kada su u pitanju izmjenjivači topline [3]. U tablici 4.2. prikazani su proizvođači geotermalne opreme i instalacija na razini ispod zemlje s lokacijom njihovog djelovanja, ali koji djeluju i u Europi.

**Tablica 4.2.** Proizvođači (opskrbljivači) geotermalnom opremom i tvrtke za usluge bušenja u Europi (2020.) [3]

<b>Proizvođač opreme</b>	<b>Djelovanje</b>	<b>Vlasnik/Bušać platforme</b>	<b>Djelovanje</b>
Aker Solutions	Diljem svijeta	Anger	Europa
Amec	Diljem svijeta	Apache	Diljem svijeta
Bentec	Europa	Boldon Drilling	Europa
BHGE	Europa	BAUER	Europa
Cape Industrial Services	Diljem svijeta	Celler Brunnenbau	Diljem svijeta
Drillmec	Europa	COFOR	Europa
Drillstar	Europa	CROSCO	Europa
Fangmann	Europa	DAFORA	Europa
Fugro	Diljem svijeta	Dalrup	Europa
Halliburton	Diljem svijeta	Enel GP	Europa
Huisman	Europa	Herrenknecht	Europa
Herrenknecht	Europa	Iceland Drilling	Europa
Marathon	Diljem svijeta	ITAG	Europa
Noble Drilling	Europa	KCA Deutag	Europa
Odfell Drilling	Diljem svijeta	Maersk	Diljem svijeta
Schlumberger	Diljem svijeta	Marriott Group	Diljem svijeta
Weatherford	Europa	NOV	Diljem svijeta
Welltec	Europa	SAIPEM	Europa
Scientific Drilling	Diljem svijeta	SMP	Diljem svijeta
Transmark EDS	Europa		

U tablici 4.3. su prikazane i analizirane najvažnije europske tvrtke za instalaciju geotermalne opreme na razini iznad zemlje. Također je prikazan ukupan broj proizvodnih postrojenja, proizvodna postrojenja u Europskoj uniji, postotak proizvodnje u Europskoj uniji i sjedište tvrtke. Pod geotermalnu opremu su uvrštene turbine, izmjenjivači topline, potopne crpke i rashladni tornjevi.

**Tablica 4.3.** Europske tvrtke u geotermalnim instalacijama iznad razine zemlje (2019.) [3]

<b>Komponenta</b>	<b>Naziv tvrtke</b>	<b>Ukupno proizvodnih postrojenja</b>	<b>Proizvodna postrojenja u EU</b>	<b>Postotak proizvodnje u EU</b>	<b>Sjedište</b>
Turbina	Ormat	>1	0	0%	Van EU
	Exergy	2	1	50%	EU
	Atlas Copco-Exergy	5	1	20%	EU
	Turboden Heat exchanger	1	1	100%	EU
Izmjenjivač topline	Alfa Laval AB	42	22	52%	EU
	Danfoss & Sondex Holdings	69	36	52%	EU
	Kelvion Holdings GmbH	49	32	65%	EU
	Gunter AG & Co. KG	8	3	38%	EU
	Hamon % Cie International SA	3	1	33%	EU
	SWEP international	5	2	40%	EU
	Schlumberger	17	4	24%	Van EU

Potopne crpke	ITT/ Goulds	12	1	8%	Van EU
	Flowserve	10	5	50%	Van EU
	Borets company	7	1	14%	Van EU
	Canadian ESP	1	0	0%	Van EU
Rashladni toranj	Babcock & Wilcox	9	3	33%	Van EU
	Ecolab/Nalco	11	3	27%	Van EU

U tablici nisu navedene sve tvrtke za izmjenjivače topline, potopne crpke i rashladne tornjeve zbog nedostatka podataka. Kada su u pitanju izmjenjivači topline važno je još napomenuti tvrtku SPX Corporation koja posjeduje ukupno 28 proizvodnih postrojenja, od kojih se 5 ili manje nalaze u Europskoj uniji s time da je sjedište tvrtke van Europske unije. Tvrtka za potopnu crpku Baker Hughes ima više od 20 ukupno proizvodnih postrojenja te se 3 nalaze u Europskoj uniji, sjedište tvrtke se nalazi izvan granica Europske unije. Za rashladne tornjeve izuzetno je bitna tvrtka SPX koja posjeduje 28 ukupno proizvodnih postrojenja, 5 ili manje postrojenja se nalazi u Europskoj uniji s time da je sjedište tvrtke van Europske unije[3]. Zaključno se iz tablica 4.2. i 4.3. vidi da Europske tvrtke imaju prostora za napredak kada je u pitanju implementacija opreme i geotermalnih instalacija na razini iznad zemlje (turbine, izmjenjivači topline, potopne crpke i rashladni tornjevi), ali i na razini ispod zemlje ( opskrbljivači opremom i tvrtke za bušenje).

### **4.3. Specifikacije opreme vodećih tvrtki za geotermalnu opremu iznad razine zemlje**

U ovom poglavlju biti će opisane najveće i najrasprostranjenije tvrtke za proizvodnju geotermalnih turbina, generatora, izmjenjivača topline i potopnih crpki. Osim opisa tvrtki dati će se i uvid u specifikacije samih proizvoda. U najveće tvrtke za proizvodnju geotermalnih turbina i generatora spadaju Mitsubishi, Siemens, Fuji Electric, Toshiba, Ormat Technologies Inc i Ansaldo Energia. Kelvion i SWEP su broj jedan u proizvodnji izmjenjivača topline. Kada je riječ o potopnim crpkama najveći proizvođači su SLB, ITT Goulds Pumps i Flowserve. U sljedećim poglavljinama će se radi lakšeg razumijevanja opisati svrha svakog elementa i dati će se detaljnije specifikacije o svakom elementu.


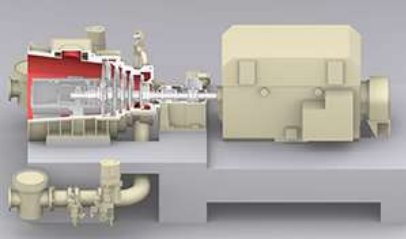
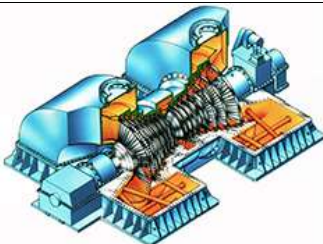
### **4.3.1. Geotermalne turbine**

Geotermalne turbine su ključan element u proizvodnji električne energije. Kako bi se mogla iskoristiti geotermalna energija neophodno je imati turbine. Geotermalna energija odnosno para pokreće turbinu, a turbina pogoni generator koji proizvodi električnu energiju. Spomenute su geotermalne elektrane s binarnim ciklusom, suhom parom i separiranjem pare. Geotermalne elektrane na suhu paru, dovode paru direktno iz geotermalnog izvora na turbinu koja pogoni generator. Separiranje pare podrazumijeva dovođenje vode pod visokim tlakom iz dubokih bušotina, te prilikom izlaska na površinu voda naglo prelazi u paru i pokreće turbinu. Binarni ciklus iskorištava geotermalnu vodu za zagrijavanje sekundarne tekućine koja isparava i aktivira samu turbinu.

#### **4.3.1.1. Mitsubishi Power**

MITSUBISHI POWER je jedan od vodećih proizvođača turbina. Tvrtka je smješтана u Aziji točnije u Japanu, osnovani su 2014. godine. Neki od njihovih glavnih proizvoda su: plinske turbine, parne turbine, kotlovi, generatori, sustavi za upravljanje, elektrane s kombiniranim ciklusom plinskih turbina, geotermalne elektrane te ostali proizvodi. Njihova politika poslovanja se bazira na dekarbonizaciji, razvitku novih pouzdanih „zelenih“ tehnologija za proizvodnju električne energije. Plasirali su velik broj parnih turbina za geotermalne elektrane. Broj isporučenih jedinica je veći od 100 (sveukupno instalirane snage 3.000 MW). Fokus nije samo na velikim parnim turbinama, nego su se posvetili i manjim jedinicama kako bi uspjeli zadovoljiti što šire tržišne zahtjeve. Razvili su tri tipa kućišta: SC1F (jednostruko kućište s jednim smjerom ispuha), SC2F (jednostruko kućište s dva smjera ispuha) i TC4F (tandem spoj, odnosno dvostruko kućište s četiri smjera ispuha). Zadovoljili su velike zahtjeve tržišta na način da su dizajnirali turbine za jednokratne, dvostruke i trostruke cikluse [15].

**Tablica 4.4.** Tipovi okvira Mitsubishi turbina za geotermalne elektrane [15]

Tip (okvir)	Slika	Izlazna snaga
SC1F ispuh prema gore		30 MW
SC1F aksijalni ispuh		45 MW
SC2F ispuh prema dolje		110 MW

Tablica 4.5. prikazuje smjerove ispuha parnih turbina te karakteristike parnih turbina za geotermalne elektrane. Mitsubishi je dizajnirao turbine s ispuhom prema gore i dolje te s aksijalnim ispuhom. Različite vrste ispuha su nužne kako bi se zadovoljili drugačiji rasporedi zgrada u kojima se nalaze turbina-generator (TG) i kondenzator.

**Tablica 4.5.** Karakteristike i smjerovi ispuha Mitsubishi parnih turbina [15]

Smjer ispuha	Ispuh prema dolje	Ispuh prema gore	Aksijalni ispuh	
			Kondenzator s površinskim hlađenjem	Direktni kontakt kondenzator
Visina TG zgrade	Visoka	Srednja	Niska	Niska
Okvir turbine	SC1F SC2F TC4F	SC1F SC2F	SC1F	SC1F
Izlazna snaga	~ 160 MW	~ 90 MW	~ 60 MW	~ 60 MW

Iz tablice se može zaključiti da ispuh prema dolje zahtjeva najveću visinu turbina-generator zgrade, ali da također razvija i najveću izlaznu snagu od približno 160 MW. Aksijalni ispuh ima najnižu visinu turbina-generator zgrade, koristi okvir turbine SC1F te postiže izlaznu snagu od približno 60 MW.

Mitsubishi je koristio napredne tehnologije u proizvodnji turbina za geotermalnu elektranu, razlog tome su korozivni plinovi te nečistoće poput soli i šljunka. Upravo je to razlog iz kojeg dizajn parnih turbina osim visoke učinkovitosti mora imati i vrlo veliku otpornost na koroziju. Mitsubishi koristi materijale s vrlo niskim udjelom sumpora pri izgradnji rotora CrMoV (slitina kroma, molibdena i vanadija). Ovakav rotor je znatno otporniji na koroziju i pucanje izazvano naprezanjem, to je postignuto manjom koncentracijom sumpora i nikla te s idealnim izborom temperature za kaljenje rotora. Lopatice rotora su također pomno birane te se koristi materijal 12Cr/17-4PH: najčešće se upotrebljava nehrđajući čelik s 12% kroma, no ukoliko su lopatice duže na njih djeluje veća sila naprezanja, osim sile naprezanja prisutno je pojavljivanje mrlja i naslaga pa se preporučuje materijal 17-4PH (sastoji se od približno 17% kroma, 4% nikla, a PH je zapravo proces toplinske prerade). Čelik 17-4PH je otporniji na koroziju protiv elementa H<sub>2</sub>S (sumporovodik), koji je čest u geotermalnoj pari. Ima još veću otpornost na sile naprezanja te veću izdržljivost od korozije. Sekundarni gubici i gubici zbog trenja fluida smanjeni su upotrebom trodimenzionalnih lopatica, te se na taj način optimizirao dizajn profila lopatice i povećala učinkovitost lopatica. Kompaktne lopatice su postignute dizajniranjem integralnih lopatica s obodom (ISB), te one predstavljaju lopatice kojima su korijenski dio, profilni dio i obod jedno tijelo. ISB lopaticama se smanjila potreba za preciznošću prilikom samog sklapanja lopatica s više posebnih proizvedenih dijelova. ISB lopatice su doprinijele većem prigušenju vibracija. Dodatno su povećali pouzdanost i učinkovitost sa smanjenjem curenja radnog medija na vrhovima lopatica. Hvatači odvoda služe za smanjivanje erozije koje prouzrokuju kapljice vode, oni su dizajnirani na način da eliminiraju kondenzirane kapljice vode u niskotlačnim fazama. Ukoliko se radi o izuzetno korozivnim uvjetima pare postoje i neke dodatne tehnologije, materijal rotora 12Cr, na ovaj način se povećava količina kroma kako bi se dodatno poboljšala otpornost na koroziju i pucanje. Ukoliko je koncentracija klora visoka u geotermalnoj pari često se znaju koristiti lopatice prve faze odnosno lopatice od titanija. Toplinsko prskanje odnosno premazivanje se može primijeniti na dijelove koji su osjetljivi na koroziju, te se na taj način dodatno povećava otpornost na koroziju [15].

### 4.3.1.2. Siemens Energy

Siemens Energy je tvrtka koja je smještena u Münchenu. Turbine su u doticaju s vrlo visoko korozivnom parom koja lako uništava i troši konvencionalne materijale. Uvjet pare je nizak, no protok volumena biva jako visok. Zato pred turbinama postoje mnogobrojni izazovi poput: odabira odgovarajućih materijala s ciljem sprječavanja ranog propadanja geotermalnih lopatica, prisutni napadi korozije koji dovode do umora u geotermalnim lopaticama te smanjena čvrstoća materijala koja često dovodi do otkazivanja rotora. Siemens Energy Service je tvrtka koja djeluje na globalnoj razini duže od 20 godina, za to vrijeme su provedeni veliki popravci, isporuke novih rotora, redizajn i zamjena potpunih putanja lopatica od svih velikih proizvođača geotermalne opreme odnosno turbina.

Turbine tvrtke Siemens dizajnirane kao skup standardiziranih okvira, na taj način svaka veličina okvira sadrži fiksni raspon ležaja i u većini slučajeva standardiziranu ovojnici koju je ipak moguće mijenjati prema potrebnom broju stupnjeva turbine i obrnuto promjenjivom promjeru ulaza. Zaključiti se može da će turbina s većim tlakom imati manji ulaz, a veći broj stupnjeva. Svaka turbina marke Siemens je dizajnirana s impulsnom vrstom parnog puta, takve su se turbine u prodaji i na tržištu zbog većeg otvora grla prikazale znatno prikladnije u geotermalnoj primjeni. Turbine manjih dimenzija (SST-400 GEO veličine od 1 do 3) napravljene su tako da odgovaraju za kondenzacijski tlak i za povratni tlak (puštaju se u binarni ciklus sa donje strane), veće turbine (veličine 4 i više) dizajna su samo za kondenzacijsku primjenu. U tablici 4.6. su opisane specifične karakteristike turbina SST-400 GEO i SST-500 GEO veličine od 1 do 6 [16].

**Tablica 4.6.** Karakteristike Siemens Energy turbina [16]

Tip Siemens turbine	SST-400 GEO						SST-500 GEO		
	1		2		3		4	5	6
Veličina									
Kondenzacija (kon) /povratni tlak (pt)	kon	pt	kon	pt	kon	pt	kon	kon	kon
Maksimalna izlazna snaga (MW)	10	15	19	30	35	40	50	70	120
Brzina turbine (o/min)			5500	5000			3000/ 3600	3000/ 3600	3000/ 3600



<b>Parametri pare</b>									
Maksimalni tlak ispušne pare (bar)	0.4	1.4	0.4	1.4	0.4	1.4	0.4	0.4	0.4
Maksimalni tlak ulazne pare (bar)	12		12		15		15	15	15
Maksimalna temperatura ulazne pare (°C)	250		250		250		250	250	250
<b>Specifikacija</b>									
Jednostruki protok/dvostruki protok	jednostruk	jednostruk	jednostruk	jednostruk	jednostruk	dvostruk	dvostruk	dvostruk	dvostruk
Konfiguracija ispuha	aksijalni	aksijalni	aksijalni	aksijalni	aksijalni	radijalni	radijalni	radijalni	radijalni
Prijenosni ili izravni pogon	prijenosni	prijenosni	prijenosni ili izravni	izravni	izravni	izravni	izravni	izravni	izravni
50 Hz / 60 Hz	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60	50 ili 60
<b>Dimenzije turbine i generatora</b>									
Turbina ( $D \cdot \check{S} \cdot V$ ) [m]	3,7·3·3,2		6,5·3,9·4,5		9,4·6,4·5,1				
Težina (t)	31		100		240				
Generator ( $D \cdot \check{S} \cdot V$ ) [m]	7·4·5		5,7·3,5·3,5		8,6·7,8·4,6				
Težina (t)	35		52		140				

Turbine većih veličina 5 i 6 razvijaju veću maksimalnu izlaznu snagu, imaju dvostruki protok te radijalni ispuh. Kada je riječ o brzini vrtnje turbine (5500 o/m) i o pogonu (prijenosni) kod turbine SST-400 GEO da se zaključiti da je potrebna redukcija brzine vrtnje, odnosno da se brzina mora prilagoditi te ona ne iznosi 5500 o/min već manje, isto vrijedi za turbine veličine 1 i 3. Ukoliko je brzina vrtnje turbine 3000 okretaja po minuti radi se o frekvenciji od 50 Hz, a ako iznosi 3600 okretaja po minuti riječ je o frekvenciji od 60 Hz.

Siemens je posvetio pažnju prilikom dimenzioniranja turbina na sve specifične zahtjeve izvora, odnosno putanje lopatica su prilagođene unutar standardizirane ovojnice. Hitni i kontrolni ventili su dizajnirani u ovisnosti o tlaku pare i protoku mase. Kako bi se maksimizirala učinkovitost lopatice su impulsnog tipa, suvremeni korijeni lopatica dovode do smanjivanja vršnog stresa i otporniji su na koroziju. Među mlaznicama postoji dovoljan razmak koji pridonosi smanjenju taloženja kamenca i rizika blokade.

Stanje zasićenosti je najčešći oblik u kojemu geotermalna para dolazi na turbinu. Širenjem takve pare dolazi do formiranja i nakupljanja kapljica vlage. Potrebno je ukloniti tekuće kapljice iz turbine, kako bi se povećala ukupna učinkovitost turbine. Siemens sustav uklanjanja vlage (MRS) sastoji se od najsuvremenijih separatora vlage na svakoj fazi, spojenih s optimalno dizajniranim sustavima odvodnje. Takav sustav omogućuje odvodnju maksimalne količine vode iz svake faze. Dizajn sustava odvodnje je sačinjen od vanjskih otvora koji garantiraju pravilno uklanjanje vlage. Pomoću povratnih informacija plutajućih prekidača te vizualnih alarmnih uređaja smanjena je mogućnost blokiranja sustava odvodnje. Vrhunskim dizajnom sustava uklanjanja vlage maksimizirana je učinkovitost turbina, a minimizirana je mogućnost udara kapljica [16].

#### **4.3.1.3. Fuji Electric**

Sjedište tvrtke Fuji Electric nalazi se u Japanu (Tokyo). Isporučili su preko 60 geotermalnih turbina kako u Japanu, tako i u ostalim dijelovima svijeta. Najveća geotermalna elektrana na svijetu Malitbog (smještena na Filipinima), instalirane snage 232,5 MW ima turbinu Fuji Electrica. Uključeni su u dizajn, proizvodnju te izgradnju geotermalnih elektrana, što znači da se nisu posvetili samo proizvodnji pojedinačnih dijelova opreme za geotermalne elektrane.

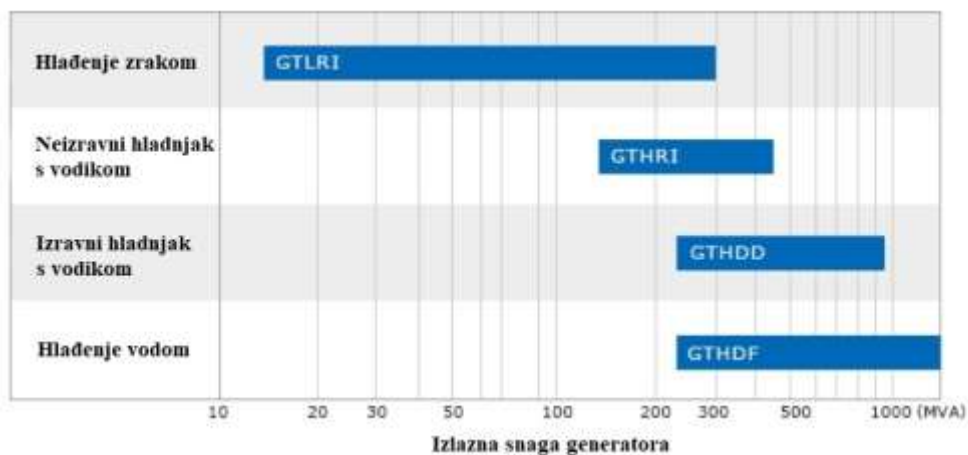
Turbine Fuji Electrica imaju učinkovita i pouzdana rješenja za primjene u geotermalnim elektranama. Neke od njihovih značajka su [17]:

- Niska brzina pare - erodiranje lopatica geotermalnih turbina proporcionalno je trećoj potenciji brzine kojom kapljice vode i čestice sadržane u geotermalnoj pari prolaze kroz lopatice. Para u reaktivnom stanju ima otprilike upola manju brzinu u odnosu na impulsno stanje pare. Iz toga se da zaključiti da će reaktivne turbine imati duži vijek trajanja te manju potrebu za zamjenu lopatica.
- Nisko uzbuđenje prolaska mlaznice – direktno je vezano sa snagom cikličkog stresa na pokretnim lopaticama i znatno je niže u reaktivnom stanju u odnosu na impulsno stanje.

Razlog tome je što razmak između mlaznica (nepokretnih lopatica) i pokretnih lopatica u impulsnoj turbini mora biti što manji da bi se ostvarila prihvatljiva razina učinkovitosti turbine.

- Lopatice s okruglom glavom i red lopatica sa širokim grlom – ukoliko se usporede konvencionalne lopatice tankog profila i lopatice s okruglom glavom, može se primijetiti da su lopatice s okruglom glavom manje osjetljive na koroziju i eroziju uzrokovanu geotermalnom parom. Posjeduju veću prirodnu frekvenciju koja omogućava sigurniji rad. Široko grlo na izlazu lopatica smanjuje, odnosno gotovo nema mogućnosti gušenja zbog taloženja nečistoća koje su sadržane u geotermalnoj pari.
- Visokotlačne pokretne lopatice s integriranim omotačem i samostojeće niskotlačne pokretne lopatice – integrirani omotač pojedinačnih lopatica pravi jedan čvrsti prsten omotača nakon završetka umetanja lopatica i obrade vanjskog opsega omotača. Sila frikcije na omotaču ima značajan učinak eliminacije prigušenja vibracija lopatica, te to čini druge načine učvršćivanja nepotrebnima. Duge samostojeće lopatice su u potpunosti neovisne, odnosno nemaju žicu za vezivanje. Na taj način je vibracija lopatica jednostavna i može se jednostavno ugoditi kako bi se izbjegla rezonancija uzrokovana uzbudnim silama. Prednji rub niskotlačnih lopatica je zaštićen štitnicima od strelita kako bi se povećala otpornost na koroziju [17].

Kako bi postigli brzinu i dobru tehnologiju koriste čvrsti rotor tipa bubnja s reaktivnim lopicama visoke učinkovitosti koji ima 3000 ili 3600 okretaja po minuti ovisno o frekvenciji. Tipovi turbina koje proizvodi Fuji Electric su: kondenzacije turbine, kondenzacijske turbine s jednim ekstrakcijskim stupnjem, kondenzacijske turbine s dvostrukim ekstrakcijskim stupnjem i kondenzacijske turbine s prijemom [17].



**Slika 4.1.** Tipovi generatora tvrtke Fuji Electric [17]

Na slici 4.1.se nalaze tipovi generatora tvrtke Fuji Electric, a u tablici 4.7. dan je opis koda modela.

**Tablica 4.7.** Opis koda modela pojedinog tipa generatora [17]

Naziv proizvoda	GT	Turbogenerator
Vrsta rashladnog medija	L	Zrak
	H	Vodik
Sustav hlađenja rotora	R	Izravno radijalno hlađenje
	D	Izravno aksijalno hlađenje
Sustav hlađenja statora	I	Neizravno hlađenje
	D	Izravno hlađenje plinom (vodikom)
	F	Hlađenje tekućinom (vodom)

Zaključuje se da oznaka GTHDF označava turbogenerator koji kao vrstu rashladnog medija ima vodik, sustav hlađenja rotora je izravno aksijalno hlađenje i sustav hlađenja statora koji se hladi tekućinom, odnosno vodom.

Fuji Electric ima mnoštvo instaliranih geotermalnih elektrana diljem svijeta, neke zemlje u kojima su postavili najviše geotermalnih elektrana su: Kina, Turska, Kenija, Indonezija, Japan, Novi Zeland, El Salvador, Filipini, Island, Meksiko i SAD [17]. U tablici 4.8. su prikazane neke od većih geotermalnih elektrana s naznačenim njihovim karakteristikama.

**Tablica 4.8.** Geotermalne elektrane Fuji Electrica [17]

Naziv	Država	Puštena u rad	Tip turbine	Tehnologija	Izlazna snaga [MW]
Kizilidere II	Turska	2013.	reakcijska, dva cilindra, jednostruk tok s povratnim tlakom	tri stupnja separiranja pare	60
Olkaria (U-6)	Kenija	2021.	kondenzacijska turbina s jednim cilindrom	jedan stupanj separiranja pare	86,88

Takigami (B)	Japan	2017.	aksijalni tok, reakcijska, povratni tlak	binarna tehnologija s radnim fluidom R245fa	5,05
Landsvirkjun	Island	2017.	aksijalni tok, reakcijska, kondenzacija turbina s jednim cilindrom i jednostrukim tokom	jedan stupanj separiranja pare	2.45
Svartsengi 5	Island	2023.	kondenzacijska turbina s jednim cilindrom	dva stupnja separiranja pare	30

U tablici 4.9. su prikazane dodatne specifikacije turbina koje se nalaze u gore navedenim geotermalnim elektranama.

**Tablica 4.9.** Dodatne specifikacije Fuji geotermalnih turbina [17]

Naziv geotermalne elektrane	Tlak [bar]	Temperatura [°C]	Sadržaj plinova [%]	Tlak ispuštanja [bar]	Brzina [o/min]	Protok pare [t/h]
Kizilidere II	8,45	169,4	16,66	1,1/0,105	3000	103,2/35,7
Olkaria (U-6)	8,87	174,5	1,5	0,0595	3000	493,89
Takigami (B)	15,364	120,33	0,6	1,855	1800	474,6
Landsvirkjun	9,0	175,4	0,6	0,080	3000	273,5
Svartsengi 5	6,5	163	2,0	0,1	3000	263

#### 4.3.1.4. Ansaldo Energia

Sjedište tvrtke Ansaldo Energia je u Italiji (točnije u Genovi). U Larderellu (Italija) 1911. godine u rad su puštene prve turbinsko-generatorske jedinice Ansaldo Energie pogonjene geotermalnom parom i to se smatra prvom geotermalnom elektranom na svijetu. Ansaldo Energia posjeduje visoku razinu učinkovitosti, a i same fleksibilnosti koja se može tumačiti kao prilagodba na specifičnosti neke ograničene lokacije i specifičnosti uvjeta pare [18].

Međunarodni su lider u generaciji električne energije, uz zadovoljavanje zahtjeva održive i inovativne proizvodnje električne energije s ciljem smanjenja negativnog utjecaja na okoliš te povećanja fleksibilnosti u proizvodnji električne energije. Zbog izrazito razvijenog znanja i tehnologije, tvrtka je uključena u procese dizajna, izgradnje, puštanja u pogon, servisiranja i održavanja samih postrojenja i pojedinačne opreme. Tvrtka nudi mnoštvo visokotehnoloških komponenti u koje spadaju: plinske turbine, parne turbine, generatori i drugi [18].

Ansaldo Energia je u pogon pustila preko stotinu geotermalnih jedinica, u veličinama od 250kW do 60 MW, neovisno o dominantnom mediju u geotermalnom izvoru (para ili voda). Imaju preko 2000 MW instaliranih jedinica te im to pruža visoku razinu pouzdanosti i učinkovitosti. Turbine se temelje na impulsnoj i reakcijskoj tehnologiji, u što su uključeni strojevi s jedinim cilindrom i s jednim tokom (GT 40) te dva cilindra u kombinaciji sa dvostrukim tokom (GT 60). Imaju raznovrsne odgovore za ispušne plinove koji su u skladu sa zahtjevima postrojenja. Prema kondenzatoru izrađuju gornji, bočni i aksijalni ispušni otvor. GT parne turbine jamče visoku trajnost u uvjetima u kojima rade, te uvjete karakteriziraju visoke razine vlage, otopljene soli i kiseline. Otpornost na takve uvjete postiže se upotrebom posebnih materijala koje se koriste za rotor i lopatice kako bi se smanjio negativan utjecaj korozivnih kemikalija [18].



**Slika 4.2.** Geotermalna parna turbina tvrtke Ansaldo Energia [18]

Geotermalne parne turbine tvrtke Ansaldo Energie koriste impulsno-reakcijsku tehnologiju s novom generacijom aeroprofila i brtvljenja. Ulazna para ulazi na parne ventile leptirastog tipa. Koriste se posebni materijali i slitine pri izradi rotora i lopatica da bi se minimizirao negativan utjecaj naslaga soli i djelovanja kiselina (samim time se povećava pouzdanost postrojenja). Lopatice za zadnju fazu su izrađene u širokom rasponu od 20 inča (50,8 cm) do 31 inča (78,74cm), na taj se način mogu prilagoditi bolje s parnim specifičnostima geotermalnog izvora. Ispuh prema kondenzatoru je prema dolje, gore, aksijalno ili bočno. Različiti ispusi osiguravaju fleksibilnost prema potrebama svakog pojedinačnog kupca. Brzina okretanja ovisi o frekvenciji te će ona biti 3000 okretaja u minuti ako se radi o 50 Hz ili 3600 okretaja u minuti ako se radi o 60 Hz. Raspon snage GT turbina koje se koriste kod geotermalnih elektrana je od 15 MW do 150 MW. Kada se radi o materijalima za kondenzat i plinsku uslugu Ansaldo koristi nehrđajući čelik. Električna oprema koja je montirana na terenu, te nije bilo moguće izbjeći bakar biti će zaštićena na odgovarajući način pomoću površinske obrade (posebno bojenje, pozlaćivanje, kalajisanje) [18]. U tablici 4.10. prikazane su značajke i prednosti dizajna geotermalne turbine tvrtke Ansaldo.

**Tablica 4.10.** Prednosti i značajke dizajna geotermalnih turbina [18]

<b>Značajka</b>	<b>Prednost</b>
Impulsno-reakcijska konstrukcija	Bolja zaštita od čvrstih čestica koje ulaze u putanju pare
Nova generacija aeroprofila i brtvljenja pare	Visoka učinkovitost
Gornji ili bočni ispuh	Jednostavan raspored, koji je potpuno integriran s kondenzatorom
Patentirana dizajnerska rješenja za sprječavanje problema s otopljenim solima ili nečistoćama u pari	Pojednostavljeno održavanje

### 4.3.2. Generatori

Generatori za geotermalne elektrane su vrlo slični konvencionalnim generatorima, ali za razliku od konvencionalnih generatora moraju posjedovati još neke dodatne vrste zaštite. Korozija različitih vrsta, vlaga, kiseline i vrlo visoke temperature samo su neke od negativnih uvjeta koji djeluju na generatore u geotermalnim elektranama. Iz tog razloga generatori su specifično dizajnirani, koriste napredene tehnologije i visokokvalitetne materijale kako bi se prilagodili izazovima geotermalnih izvora (sustava). U upotrebi su vrlo slični materijali kao i kada su u pitanju turbine za geotermalne elektrane. Nehrđajući čelik ima izuzetnu otpornost na koroziju i visoke temperature. Titanij je poznat po svojoj otpornosti na koroziju u geotermalnim uvjetima te se on koristi kako bi se zaštili dijelovi generatora koji mogu biti u kontaktu sa geotermalnim fluidima. Bronca se može koristiti za zaštitu ležajeva i dijelova generatora koji nisu izravno izloženi fluidu i na taj način spriječiti koroziju. Polimerni materijali se koriste kada se želi zaštititi od kemikalija, soli i ostalih elemenata koji se mogu pronaći u geotermalnom fluidu, ti materijali se iskorištavaju prilikom izolacije, brtvljenja te zaštite generatora [4].

Fuji Electric se služi modularnim pristupom, to im omogućava vrlo jednostavnu instalaciju i skraćenu montažu generatora na samom licu mjesta. Za zaštitu od vrlo visokih temperatura i korozije koriste nehrđajući čelik i specijalne legure. Takvi materijali doprinose manjem broju potrebnih održavanja, a samim time se i povećava životni vijek opreme (generatora). Fuji kao vrstu rashladnog medija koristi zrak i vodik, hlađenje rotora je izravno aksijalno ili radijalno. Stator može biti neizravno hlađen, izravno hlađen plinom (vodik) ili izravno hlađen tekućinom (voda) [17].

Primjer jednog Fuji Electric generatora za geotermalne elektrane prikazan je u tablici 4.11.

**Tablica 4.11.** Specifikacije Fuji Electric generatora [17]

Vrsta	Zračno-hlađen turbo-generator
Izlazna snaga [kVA]	25.000
S četkicama/ bez četkica	bez četkica
Napon [kV] /frekvencija [Hz]	11/50
Izolacija/povećanje temperature	Klasa F/povećanje B



Siemens upotrebljava SGen seriju generatora, koja je prilagođena za rad u teškim uvjetima te optimizirana za industrijske primjene. Raspon snage je do 370 MVA, dizajnirani su inovativnim tehnologijama poput hlađenja vodom za stator. Temelj njihovog razvijanja je konstantno poboljšavanje generatora s povećanjem pouzdanosti, učinkovitosti i integracijom u postrojenja. SGen generatori imaju učinkovitost do 98,9%, dizajn im omogućuje 10.000 ciklusa pokretanja i zaustavljanja za vrijeme njihovog radnog vijeka, te su zato ekonomična alternativa generatora koji su hlađeni vodikom ili vodom. Modularnim dizajnom je osigurano da se svaki generator prilagodi određenim potrebama. Mehaničke sile i prijelazni događaji kao što je kratki spoj sigurno se prenose preko statorske jezgre i osnovnog okvira do temelja, putem zavarenih opružnih elemenata. Jednostavna instalacija na licu mjesta je rezultat modularnosti dizajna i samonosive strukture s integriranim poklopcem. Namotaji rotora su izravno radijalno hlađeni s ravnomjernom podjelom temperature uz pomoć računalne dinamike fluida (CFD), te to povećava učinkovitost kako bi se postigle što bolje performanse [19]. Omogućen im je rad na frekvenciji od 50 Hz i od 60 Hz.

**Tablica 4.12.** Specifikacije Siemens Energy SGen5-1000A generatora [19]

Specifikacija	Sgen5-1000 A
Frekvencija	50 Hz
Prividna snaga	25-370 MVA
Učinkovitost	do 98,9%
Dizajn za faktor snage	0,80
Priključni napon	6,3-15,75 kV

Ansaldo Energia razvila je nekoliko vrsta turbogeneratora. Turbogeneratori hlađeni vodikom i vodom optimalno su rješenje za širok opseg izlazne snage. Kao medij za hlađenje statora se koristi voda, a medij za hlađenje rotora je vodik. Ansaldo Energia dizajnira turbogeneratore hlađene vodom u skladu s PED i ATEX propisima, na taj način se omogućava siguran rad u prisustvu  $H_2$  plina. Svi generatori s vodom hlađenim statorskim namotajima sadrže laminirane prešane ploče, te se na taj način smanjuju gubici i eliminiraju se vruće točke. Tehnologija vodikom hlađenih generatora stalno se nadograđuje i poboljšava, pomoću kontinuiranih istraživanja i razvoja. Postoje i pomoćni sustavi koji se koriste za kondicioniranje i cirkulaciju vode i vodika, a oni se koriste za hlađenje i održavanje osovine podmazane uljem. Ukoliko se vodik koristi kao rashladno sredstvo, brtve osovine se postavljaju s uljem koje teče između osovine i odgovarajućih prstenova. Kako bi

bilo moguće uljno brtvljenje posjeduje se potrebna oprema za opskrbu uljem na pravoj temperaturi, tlaku i čistoći [20].

Zrakom hlađeni turbogeneratori tvrtke Ansaldo Energia omogućavaju moderno, kompaktno rješenje za bazno i vršno opterećenje. Ovi turbogeneratori posjeduju vrlo visoku učinkovitost, kvalitetu i pouzdanost. Dizajn im je robustan, održiv i fleksibilan jer se može koristiti s plinskim i parnim turbinama u jednostrukim ili višestrukim konfiguracijama. Izuzetno su učinkoviti za geotermalne primjene, Ansaldo Energia ima dugo i veliko iskustvo u odabiru materijala, dizajnu i proizvodnji generatora za geotermalne uvjete rada (vlaga i sumporovodik). Kako bi se generator zaštitio od ulaska eksplozivnih smjesa plinova, mogu omogućiti ugradnju generatora u Ex okruženju (ATEX certifikacija). 3D dizajnerskim alatima kontinuirana je analiza konačnih elemenata u mehaničkom, električnom i ventilacijskom ponašanju. Sadrže neizravno hlađene statorske namotaje i izravno hlađene rotorske namotaje, što ih čini samo-ventilirajućima u zatvorenom hlađenju zrak-voda. Ukoliko je potrebna kontaminacija zraka mogu se osigurati posebni filtri s aktivnim ugljenom [20]. U tablici 4.13. je prikazana usporedba specifikacija turbogeneratora hlađenih vodom i vodikom te turbogeneratora hlađenih zrakom.

**Tablica 4.13.** Specifikacije generatora tvrtke Ansaldo Energia [20]

Vodikom i vodom hlađen turbogenerator			Zrakom hlađen turbogenerator		
Frekvencija [Hz]	50	60	Frekvencija [Hz]	50	60
Brzina [o/min]	3000	3600	Brzina [o/min]	3000	3600
Faktor snage	0,8-0,9	0,8-0,9	Faktor snage	0,8	0,85
Nazivni napon [kV]	18-27	18-27	Nazivni napon [kV]	10,5-21	13,8-21
Raspon snage [MVA]	400-1100	30-420	Raspon snage [MVA]	20-450	30-320
Polovi	2	2			

Ansaldo Energia je od 1950. godine instalirala oko 602 jedinice turbogeneratora hlađena zrakom s ukupnom snagom većom od 70 GVA, preko 370 jedinica je namijenjeno za plinske turbine u otvorenom i kombiniranom procesu. Vodikom i vodom hlađenih turbogeneratora instalirano je oko 60 jedinica s ukupnom snagom većom od 30 GVA [20].

Mitsubishi Power isporučio je i instalirao više od 1.000 turbinskih generatora diljem cijelog svijeta, te je tako stekao izrazito dobru reputaciju za učinkovitost i pouzdanost u geotermalnom sektoru. Generatori tvrtke Mitsubishi Power sastoje se od 4 pola, zaštite od kapljica tipa IP23 te su samouzbuđujući, samoregulirajući i bezčटकasti. Imaju posve povezane damper namotaje,

sustav izolacije klase H. Uranjanjem u termo-postavljeni poliester lak namotaji su impregnirani te su otporni na vlagu, ulje i kiselinu. Drugi način zaštite je impregniranje s posebnom poliester smolom. Generatori mogu raditi na frekvenciji od 50 Hz i od 60 Hz. Rotor je izrađen od materijala s niskim udjelom sumpora, ovaj materijal rotora ima veću otpornost na koroziju, pucanje uslijed korozije i veću čvrstoću na zamor uslijed korozije. Smanjenjem količine sumpora i nikla u sastavu, te prilagodbom temperature kaljenja rotora moguće je postići veću otpornost. Pružaju generatore koji koriste različite vrste hlađenja, uključujući hlađenje zrakom, hlađenje vodikom i vodom/hidrogenom te se na taj način zadovoljavaju široki spektri potreba i zahtjeva [21].



**Slika 4.3.** Generator tvrtke Mitsubishi Power [21]

#### **4.3.3. Cijevi, izmjenjivači topline i crpke**

Kako bi geotermalna energija bila ekonomski isplativa, ključan je izbor inovativnih materijala i kvalitetno razumijevanje interakcije između materijala i otežanih uvjeta u kojima se nalaze. S kvalitetnim praćenjem situacije moći će se omogućiti optičkim vlaknima i energetskej elektronici da uspješno rade u vrlo negativnom okruženju u kojem moraju raditi. Svrha je razvoj materijala koji se koriste za izradu cijevi, kako bi se pospješila otpornost na koroziju cijevi je potrebno zaštititi vanjskim premazima i izolacijom te unutarnjim oblogama. Kako bi se omogućio rad s nultom emisijom ugljika potrebno će biti koristiti nove polimerne, keramičke ili metalne membrane za odvajanje i reinjekciju plinova. Konstantno praćenje sustava trebalo bi omogućiti pravovremenu intervenciju, s kojom će se spriječiti fatalni kvarovi bušotine. Zastoji zbog zamjena i održavanja opreme bili bi minimalizirani odabirom specifičnih metalnih legura. Izmjenjivači

topline i crpke su također ključne u geotermalnim elektranama te je kvalitetan izbor materijala izuzetno bitan za optimalan rad geotermalnih sustava [4].

#### 4.3.3.1. Cijevi

U geotermalnoj primjeni moguća je upotreba metalnih i nemetalnih cijevi. Najčešće upotrebljavana metalna cijev je karbonski čelik, koji nudi odgovarajući životni vijek ukoliko se ispravno primjeni. Nije česta upotreba nodularnog (žilavog) lijeva. Azbest-cement (AC) je uobičajeno korišten proizvod, ali negativan utjecaj na okoliš je itekako smanjio njegovo korištenje i dostupnost. Najveća prednost i privlačnost metalnih cijevi je upravo u mogućnosti podnošenja fluida izrazito visokih temperatura. Nemetalni materijali su gotovo nepropusni za većinu kemikalija sadržanih u geotermalnim fluidima te im je to izrazita prednost [4].

Čelične cijevi imaju širok spektar veličina od 0,25 inča do 72 inča ( 6,35 mm do 182,88 mm), za spoj malih cijevi koristiti se urezivanje navoja, a za velike cijevi zavarivanje. Ukoliko je cijev obložena epoksidom, koristiti se mehanički spoj kako se ne bi narušila cjelovitost materijala koji je obložen. Problem koji je izražen kod čeličnih cijevi jest korozija, postoje različite koncentracije otopljenih kiselina ili plinova u geotermalnim medijima koji uzrokuju koroziju točaka ili pukotina. Iz tog razloga se čelične cijevi koriste na čistoj strani izolacijskog materijala izmjenjivača topline, ali postoje slučajevi kada su se koristili za prijenosne linije. Ukoliko čelične cijevi nisu zaštićene odgovarajućim omotom ili katodnom zaštitom, budu vrlo osjetljive na vanjsku koroziju. Vanjska korozija uzrokuje brojne kvarove i smetnje, iz tog razloga su čelične cijevi zamijenjene cijevima od staklo-plastike. Kada se isprobao pocinčani čelik, rezultati su bili podijeljeni, jer neki geotermalni fluidi imaju sposobnost ispiranja cinka, što je također rezultiralo korozijom [4].

Nodularni lijev je vrlo sličan sivom lijevu, u sivom lijevu grafit je u obliku pahuljica, a kod nodularnog lijeva struktura je sferična. Razlika između ta dva lijeva rezultira većom čvrstoćom, fleksibilnošću i obradivošću. Korozija je vrlo velik problem za oba lijeva, ali je nodularni lijev otporniji. Vanjska zaštita se sastoji od barijere protiv vlage, unutarnja zaštita je podešena oblogom. Za obloge su dva najčešće korištena materijala cementni mort i epoksi smola. Epoksi smola omogućava radnu temperaturu od otprilike 120 °C, dok je mortna obloga otporna na temperaturu do 150 °C. Bez zaštite, najveća radna temperatura bi bila 100 °C. Upotreba nodularnog lijeva je uobičajena u sustavima niže temperature [4].

Bakrene cijevi nisu pronašle svoju primjenu za geotermalnu energiju. Geotermalni fluidi većinom sadrže  $H_2S$  (sumporovodik), upravo ta komponenta je izrazito štetna prema bakru i bakrenim legurama. Zaključuje se da se bakar ne postavlja gdje je cijev izložena geotermalnom fluidu [4].

Staklo-plastične cijevi poznatije kao RTRP ili FRP cijevi, korištene su u širokom rasponu konfiguracija. Osnova ovih cijevi je epoksi smola i poliesterska smola te su cijevi dostupne u modelima s oblogama i bez obloga. Najčešći izbor za geotermalnu primjenu su cijevi od epoksi smole s epoksi oblogom, oba modela smola epoksi i poliesterska, podržavaju temperature do 149 °C. Vrlo važna komponenta je spoj između nemetalnih cijevi. Postoje različite metode spajanja nemetalnih cijevi a to su: konusna kugla, navojni spojevi, ključni mehanički spoj i prirubnički spoj. Kod geotermalnih sustava najčešći spoj nemetalnih cijevi je tip zvono-jezičac s ljepilom [4].

Polivinil klorid (PVC) i klorirani polivinil klorid (CPVC) su također dva materijala za izradu cijevi za geotermalne primjene. PVC je niskotemperaturan (60 °C), krut termoplastični materijal. CPVC je materijal više temperaturne izdržljivosti s maksimalnom temperaturom do 99 °C. Nisu iznimni u podnošenju pritiska na ovim temperaturama i gotovo uvijek je potrebna dodatna potpora [4].

Osim navedenih postoje dodatni materijali koji se mogu koristiti za cjevovod i to su: čelik sa spojenim zglobovima, zavareni čelik, PVC spojen otapalom, umreženi polietilen i dr. Materijal koji će se koristiti za izradu cijevi najčešće je određen temperaturom i kemijskom kvalitetom geotermalnih fluida, uz osvrt na troškove [4].

#### **4.3.3.2. Izmjenjivači topline**

Izmjenjivači topline moraju učinkovito izvršiti prijenos topline između geotermalnog medija (fluida) i radnog medija turbine, vrlo uobičajeno se to odvija u korozivnim uvjetima, uvjetima visoke temperature i tlaka. Skaliranje i koroziju uzrokuju geotermalni fluidi u kojima se nalaze otopljene kemikalije, minerali, soli i druge nečistoće. Učinkovitost izmjenjivača topline je izravno uvjetovana dobrim izborom materijala otpornih na koroziju i optimalnim izborom radnog medija na koji se prenosi toplina.

Curenje tekućina za izmjenu topline je vrlo rijetko, ali se obavezno uzima u obzir iz razloga što ima negativne utjecaje na okoliš i samo stanovništvo. Kada je u pitanju izbor radnih medija za izmjenu topline postoje brojne organske i vodene tekućine. Organske tekućine proizvedene su iz naftnih i sintetičkih tekućina koje se dobivaju iz mineralnih ulja, bijelih/parafinskih ulja, sintetičkih aromatika (polifenili i alkilirani benzeni), silikoni i fluorougljici. Vodene tekućine proizvedene su prvenstveno s etilen glikolom i propilen glikolom. Ključan aspekt je raspon temperature, ne samo najviša radna temperatura za određeni radni medij. Na ekonomičan rad također utječe i viskoznost. Previsoka viskoznost zahtjeva značajnu količinu električne energije kako bi se tekućina pumpala kroz sustav. Radni mediji visokih temperatura rade na temperaturama

do 400 °C. Ukoliko je temperatura iznad 315 °C, radni medij je ograničen na sintetičke tekućine. Ispod te temperature moguće je iskorištavati radne medije na bazi mineralnog ulja, ako je riječ o niskim temperaturama radni mediji su na bazi vode (sadrže etilen glikol ili propilen glikol). Vrlo važno je odabrati radni medij nešto iznad projektirane radne temperature tekućine kako bi se dodatno produžio životni vijek radnog medija. Koeficijent prijenosa topline također se uzima u obzir. Radni medij na bazi silikona vrlo je izdržljiv i dugovječan, no nije ni blizu učinkovitosti prijenosa topline s ostalim organskim radnim medijima. Etilen glikol ima bolje uvjete prijenosa topline, što podrazumijeva veću gustoću i nižu viskoznost, ali propilen je u suštini netoksičan i ekološki prihvatljiv što je vrlo značajna stavka. Radni mediji za prijenos topline u geotermalnih sustavima moraju imati zadovoljene neke važne specifičnosti (karakteristike). Niska toksičnost, nepostojanje zapaljivosti i dobra zaštita od korozije su ključni jer su radni mediji kontinuirano u nepovoljnim i negativnim uvjetima rada. Očekivani vijek trajanja radnog medija je najmanje od 10 do 12 godina. Proizveden je i alternativni medij na bazi kalijevog formijata, te on pruža poboljšanu toplinsku vodljivost, nije zapaljiv, vrlo nisku toksičnost i ekološku prihvatljivost [4].

Kako bi se ostvarila zaštita od korozije i postigla estetska elegancija izmjenjivači topline su gotovo uvijek premazani. Kemijski konverzijski premaz, anodizacija, E-premaz i bojanje su metode premaza koje pridonose povećanju korozijske čvrstoće i estetske ljepote. Najčešće korištena metoda je kemijski konverzijski premaz (kromatni konverzijski premaz) koji je još zvan „Chem-Film“ ili alodine, on pridonosi smanjenju površinske oksidacije i može služiti kao površinska priprema za bojanje. Ukoliko je potrebno zaštititi aluminij metoda koja se koristi je anodizacija. Pomoću nje se smanjuje abrazija i korozija, modificiranjem kristalne strukture uz površinu metala, koja je skuplja u odnosu na kemijski konverzijski premaz. Najskuplja metoda je E-premaz koji je poznatiji kao elektrodepozicija ili elektropremazivanje. Istosmjernim nabojem se prilazi metalnom dijelu koji se nalazi uronjen u tekućinu sa suprotno nabijenim česticama boje, na taj se način čestice boje međusobno privlače i boja se taloži te tvori kontinuirani film preko cijele površine. Bojanje izmjenjivača topline se može izvršiti radi estetskih razloga i dodatne zaštite od korozije. Bakreni izmjenjivači topline se često premazuju bojom, razlog tome je što bakar kroz vrijeme može promijeniti boju. Ovdje su navedene četiri metode, ali postoji još niz metoda za premaz izmjenjivača topline kako radi zaštite tako i radi estetike [4].



**Slika 4.4.** Izmjenjivač topline tvrtke Kelvion Holdings [22]

Na slici 44.4. je izmjenjivač topline tipa GBH-HP tvrtke Kelvion Holdings koji ima radnu temperaturu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , te radni tlak do 140 bara [22].

#### **4.3.3.3. Crpke**

Geotermalne crpke služe kako bi izvukle geotermalni medij iz izvora pumpanjem, a zatim geotermalni fluid kroz dugu bušotinu pumpaju prema elektrani. O temperaturi geotermalnog fluida i samom mediju ovisi da li će tip geotermalne elektrane biti s binarnim ciklusom (ORC), na suhu paru ili sa separiranjem pare. Nakon što je geotermalni medij doveden do turbine i pokrene generator, ostatak geotermalnog fluida odlazi u kondenzator. Kondenzat i geotermalni fluid koji nisu prošli kroz turbinu ponovno bivaju vraćeni u geotermalni izvor pumpanjem, te se ciklus ponavlja. Crpke koje koriste geotermalne fluide niske temperature (do  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) proširile su se i u zemlje koje nisu tradicionalno geotermalne, a to su: Švedska, Danska, Švicarska itd [4].

AISI 400 nehrđajući čelici sadrže od 12% do 18% kroma, što je od iznimne važnosti za materijale lopatica turbina, crpki i ventila. Nehrđajući čelik tipa AISI 430 (feritni) i AISI 431 (martenzitni) učestalo se iskorištavaju za proizvodnju komponenti ventila i crpki u geotermalnim sustavima. Ukoliko je potrebno spriječiti probleme s rupičastom korozijom i lomovima u ventilima na izlazu iz bušotine, u geotermalnim fluidima sa značajnom količinom Cl iona, sumpora i kisika u otopini, prikladnije je koristiti AISI 430 odnosno feritni nehrđajući čelik. Toplinski, odnosno termički obrađeni martenzitni nehrđajući čelici upotrebu su pronašli u unutrašnjim dijelovima odnosno komponentama crpki i osovina. Nehrđajući čelik AISI 300 se vrlo dobro ponaša u geotermalnim

uvjetima. Potvrđeno je da se legure crvenog olovnog mesinga (CA 836 i 838) i legure crvene olovne bronce (SAE 67) mogu iskoristiti za unutarnje komponente crpki [4].

Reda Thermal tvrtke Schlumberger je energetska učinkovita potopna crpka koja pouzdano podiže geotermalni fluid iz visokotemperaturne bušotine, uz visok protok, maksimalnu električnu učinkovitost, minimalno održavanje i dug vijek trajanja. Koriste motor s trajnim magnetom i motorne dijelove velike snage. Reda Thermal potopna crpka radi pouzdano na geotermalnim bušotinama dubine do 1.500 metara i temperaturama do 225 °C. Dizajn je modularnog tipa što ubrzava instalaciju te smanjuje vrijeme rada na bušotini nekoliko dana, s 15 do 20 dana na 2 do 5 dana. Zbog samostalnog podmazivanja nema kontaminacije rezervoara ili procesne tekućine uljem za pomazivanje. Čitav rad crpke je kontinuirano promatran preko senzora u bušotini koji omogućuju praćenje parametara crpke i rezervoara te podešavanje idealnih performansi crpke, na taj se način produžuje životni vijek crpke [23].



**Slika 4.5.** Potopna crpka tvrtke Schlumberger [23]

Na slici 4.5. je prikazan model Reda Thermal potopne crpke, a specifikacije su prikazane u tablici 4.14.

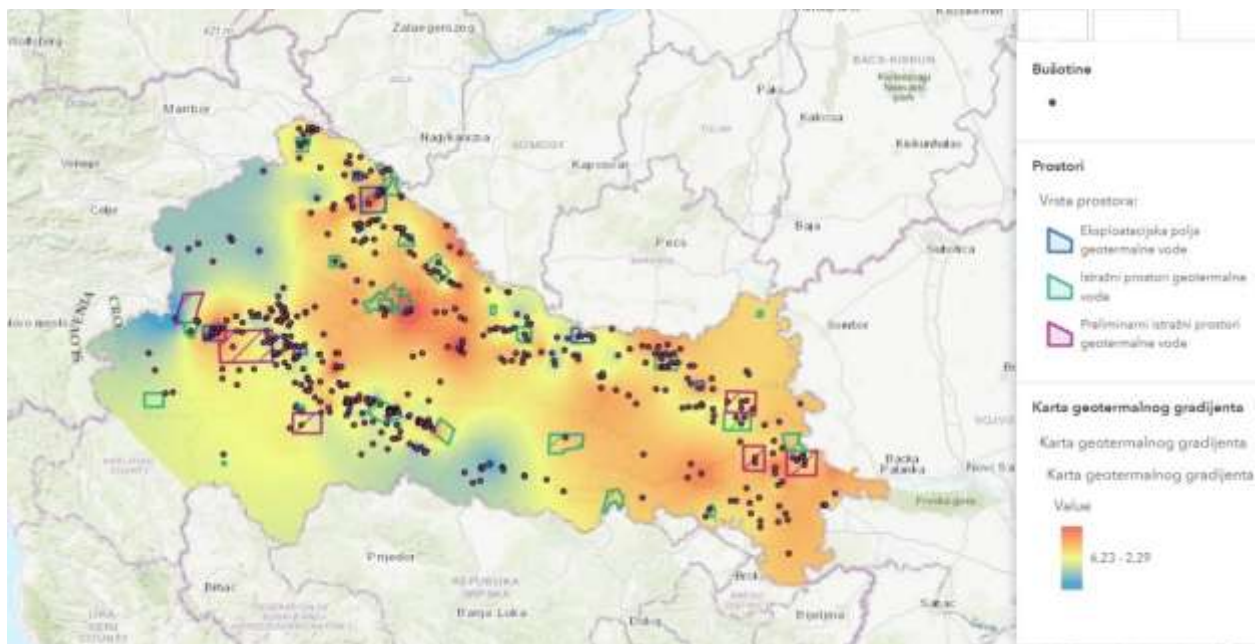


**Tablica 4.14.** Specifikacije potopne crpke Reda Thermal [23]

<b>Seriya</b>	562
<b>Maksimalna temperatura na dnu bušotine</b>	225 °C
<b>Maksimalna unutarnja temperatura motora</b>	300 °C
<b>Vanjski promjer pumpe</b>	17,15 cm – 28,58 cm
<b>Maksimalni protok pri 60 Hz</b>	16000 l/min
<b>Maksimalna snaga pri 60 Hz</b>	0,63 MW
<b>Volumetrijski kompenzator</b>	Metalni mijeh
<b>Motorno ulje</b>	Motorna tekućina s optimiziranim karakteristikama za primjenu
<b>Materijal kabla za napajanje</b>	Visokotemperaturni etilen-propilen-dien-terpolimer (EDPM)
<b>Metalni sastav</b>	Ugljični čelik, Ni-Resist, ICONEL ili posebne legure i opcije premaza
<b>Mjerač dubine</b>	opcionalan

## 5. TEHNO-EKONOMSKI I TERMODINAMIČKI PRORAČUN STUPNJA DJELOVANJA GEOTERMALNE ELEKTRANE VELIKA 1

Izrađena je interaktivna karta geotermalnog potencijala Hrvatske, koju je izradila agencija za ugljikovodike te se u njoj se nalaze najnoviji podaci o geotermalnim, konzerviranim, proizvodnim, mjernim, likvidiranim i napuštenim geotermalnim bušotinama. Određene su koordinate svake pojedine bušotine i iznimno bitni podaci o svakoj pojedinačnoj bušotini, a te podatke čine: koordinate bušotine, status bušotine, nadmorska visina, geotermalni gradijent i maksimalna izmjerena temperatura. Prikazani su podaci o kolonama: naziv kolone, kratica, godina bušenja i konačna dubina, također su dostupni podaci s mjerenja u koje spadaju: indikacija vode, naziv kolone, vrsta mjerenja, interval mjerenja, protok, temperatura i tlak. Karta ima naznačena eksploatacijska polja geotermalne vode, istražne prostore geotermalne vode i preliminarne istražne prostore geotermalne vode. Eksploatacijska polja, istražni prostori i preliminarni prostori sadrže podatke o ovlašteniku, početku dozvole, završetku dozvole i površini prostora. Cijela karta je šrafirana geotermalnim gradijentom koji varira od 2,29 °C/100m do 6,23 °C/100m [24].



**Slika 5.1.** Interaktivna karta [24]

Na slici 5.1. prikazana je interaktivna karta. Legenda prikazuje da su točkama označene bušotine, plavim linijama eksploatacijska polja, zelenim linijama istražni prostori i ljubičastim linijama preliminarne istražni prostori geotermalne vode. Zaključuje se da je veći toplinski geotermalni gradijent postignut na područjima uz Dravu. Područja uz Zagreb, Novoselec, Bjelovar, Lunjkovec-Kutnjak, Grubišno Polje, Budrovce i Vinkovce imaju najveći geotermalni gradijent.

Trenutno je u Hrvatskoj 8 eksploatacijskih polja geotermalne vode, 25 istražnih prostora geotermalne vode i 6 preliminarnih istražnih prostora geotermalne vode.

Ova analiza temelji se na teorijskim pretpostavkama za temperature koje su potrebne za rad geotermalnih elektrana. U obzir će se uzeti temperature do 150 °C i veće od 150 °C. Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom iskorištavaju geotermalni medij niže temperature, odnosno geotermalni medij služi za zagrijavanje radnog medija koji isparava. Najmanja temperatura koja je prihvatljiva za geotermalne elektrane s binarnim ciklusom je 90 °C. Geotermalne elektrane na suhu paru i sa separiranjem pare zahtijevaju geotermalni fluid temperature veće od 150 °C, samim time imaju i veću učinkovitost u odnosu na geotermalne elektrane s binarnim (ORC) ciklusom. Iz tog razloga će biti prikazane dvije tablice, prva tablica će predstavljati bušotine koje su potencijalno dobre za geotermalne elektrane s binarnim ciklusom ( $\geq 90$  °C i  $\leq 150$  °C), a druga tablica će predstavljati bušotine koje bi odgovarale konvencionalnim geotermalnim elektranama na suhu paru i geotermalnim elektranama sa separiranjem pare ( $>150$  °C). Dostupni podatak iz interaktivne karte je maksimalna izmjerena temperatura određene bušotine, koja će biti uspoređena s referentnim vrijednostima temperature, točnije temperatura će biti pokazatelj potencijala određene bušotine za proizvodnju električne energije.

**Tablica 5.1.** Bušotine s potencijalom za geotermalnu elektranu s binarnim ciklusom [24]

Naziv Bušotine	Geotermalni gradijent [°C/100m]	Maksimalna temperatura [°C]	Konačna dubina [m]
Sisak 1	3,8	122	2951
Otok 1	4,4	145	3059
Cerna 1	4,3	148	3191,2
Vinkovci 3	5,4	107,7	1779
Ernestinovo 3	3,7	125,5	3106
Antunovac 1	4,7	103	1975
Magadenovac 1	3,9	120	2798
Velike Plane 1	3,4	115	3061
Tekić 1	4,2	119	2575
Bockovci 1	4,1	138	3102
Bršadin 1 Alfa	4,4	110	2232

Tablica 5.1. prikazuje geotermalne bušotine koje prema svojim maksimalnim izmjerenim temperaturama imaju potencijal za proizvodnju električne energije. Proizvodile bi električnu energiju pomoću tehnologije binarnog ciklusa (Organski Rankineov ciklus), zato što geotermalni medij nema dovoljnu temperaturu te bi on zagrijavao radni medij koji ima nižu točku vrelišta.

**Tablica 5.2.** Bušotine s potencijalom za geotermalne elektrane na suhu paru i separiranje pare

<b>Naziv Bušotine</b>	<b>Geotermalni gradijent [°C/100m]</b>	<b>Maksimalna temperatura [°C]</b>	<b>Konačna dubina [m]</b>
Merhatovec 1	3,5	156	4195
Koprivnički Bregi-2	4,1	213,3	4964
Podravski Novigrad-1	4,7	187,8	3787
Lešćan-2	3,7	192	4835
Banova Jaruga 3	3,9	193	4712
Suhopolje 1	3,8	200	4987,5
Orešac 2	3,8	245	6102
Okrugljača 1	3,6	180	4651
Dinjevac 1	3,2	188	5500
Miljanovićevo 1	3,2	191	5603
Donja Bukovica-1	3,6	174	4496
Babina Greda-1	3,9	161	3802
Ernestinovo 2	3,9	159	3790
Stjepanik-1 Alfa	3,4	182	5028
Bakić 1	3,6	189	4999
Rezovačke Krčevine-1 Istok	3,6	205	5435
Virovitica-3 Alfa	4	161	3739
Severovci-1	4,8	175	3410

Ukoliko se bazira na maksimalne izmjerene temperature pojedine bušotine te ih se usporedi sa referentnom temperaturom od 150 °C, može se zaključiti da Hrvatska ima znatan potencijal u geotermalnom spektru. Ulaganjem u instalaciju geotermalnih elektrana s binarnom tehnologijom, geotermalnih elektrana sa separacijom pare i geotermalnih elektrana na suhu paru, znatno bi se povećao udjel obnovljivih izvora u zadovoljavanju dnevnog dijagrama opterećenja. Na taj bi se način došlo do „zelenije“ i ekonomičnije proizvodnje električne energije u Republici Hrvatskoj.

Eksploatacijsko polje Lunjkovec-Kutnjak smješteno je u općini Mali Bukovec. Ovlaštenik eksploatacijskog geotermalnog polja je tvrtka Bukotermal, koja je ujedno i obavila istraživanja geotermalne vode. Nakon istraživanja zaključeno je da postoji vrlo dobar potencijal za proizvodnju električne energije na geotermalnom polju, uz električnu energiju moći će se još koristiti i toplinska energija. Na dubini od 2430 metara, otkrivena je geotermalna voda temperature 142 °C. Previđa se izgradnja geotermalne elektrane snage 16 MW. Osim geotermalne elektrane planira se izgraditi: toplana, sušara povrća, plastenici za uzgoj cvijeća i povrća i toplice [25].

**Tablica 5.3.** Karakteristike bušotina Lunjkovec-1 i Kutnjak-1 [24]

	<b>Lunjkovec-1</b>	<b>Kutnjak-1</b>
<b>Status bušotine</b>	mjerna	utisna
<b>Nadmorska visina</b>	141,2	137,35 m
<b>Geotermalni gradijent</b>	5,4 °C/100m	5,4 °C/100m
<b>Max. izmjerena temperatura</b>	130 °C	142,5 °C
<b>Naziv kolone</b>	Lunjkovec-1	Kutnjak-1
<b>Kratica</b>	Lun-1	Kt-1
<b>Godina bušenja</b>	1976.	1969.
<b>Konačna dubina</b>	2203.	2430 m

U tablici 5.3. prikazane su karakteristike bušotina Lunjkovec-1 i Kutnjak-1. Vidljivo je da su neke karakteristike vrlo slične geotermalnoj bušotini Velika Ciglena-1 Alfa, te se može zaključiti da bi geotermalna elektrana Lunjkovec-Kutnjak također mogla biti temeljena na binarnom ciklusu. Razlog tome je mala temperatura geotermalnog medija i zbog toga bi on služio za zagrijavanje radnog medija koji ima nižu temperaturu vrelišta.

## 5.1. Geotermalna elektrana Velika 1

Geotermalna elektrana Velika 1 je prva geotermalna elektrana u Hrvatskoj, smještena je u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji u mjestu Ciglena. Puštena je u rad u prosincu 2018. godine. Geotermalni izvor je otkrila INA-Naftaplin 1990. godine prilikom podzemnih istraživanja s ciljem otkrivanja nafte. Umjesto nafte, pronađen je kvalitetan potencijal za geotermalnu energiju [26].



**Slika 5.2.** Organski Rankineov sustav (ORC) tvrtke Turboden [26]

Velika 1 crpi geotermalnu vodu kroz dvije proizvodne bušotine s dubine od oko 2800m. Iskorištava paru i vodu temperature 170 °C za proizvodnju električne energije, te na taj način napaja lokalnu električnu mrežu. Tehnologija koja se koristi u velikoj je ORC (Organski Rankineov ciklus) turbogenerator s 5-stupanjskom aksijalnom turbinom koju je proizvela tvrtka Turboden. Brzina rotacije je 1500 okretaja po minuti, zajamčene su minimalne vrijednosti vibracija od oko 1 mm/s i glatki rad. Aksijalnih 5 stupnjeva je omogućilo elektrani visokoučinkovito ponašanje prilikom rada u svim uvjetima okoline i na različitim razinama ulazne snage. Turboden je izabrao ciklus koji ima jedan stupanj tlaka te je on idealan izbor za prilagođavanje krivulja izmjene topline i jednostavne konfiguracije postrojenja. Iz tog razloga postiže se 4% veća neto izlazna snaga uz uštedu od 8% kapitalnih izdataka u usporedbi s drugim mogućim rješenjima. Velika 1 je jedna od najvećih ORC turbina na svijetu. U tablici 5.4. su prikazane specifikacije geotermalne elektrane Velika 1 [26].

**Tablica 5.4.** Specifikacije geotermalne elektrane Velika 1 [26]

<b>Naziv</b>	Velika 1
<b>Lokacija</b>	Ciglena, Bjelovarsko-bilogorska, Hrvatska
<b>Status</b>	U radu od prosinca 2018. godine
<b>Primjena</b>	Geotermalna
<b>Opis</b>	Samo proizvodnja električne energije
<b>Model</b>	Po mjeri
<b>Snaga</b>	17,5 MW <sub>e</sub>
<b>Temperatura vode (pare)</b>	170 °C
<b>Radni medij</b>	Izobutan

Geotermalna elektrana Velika 1 crpi geotermalni fluid iz dvije proizvodne bušotine te ga isporučuje u binarno (ORC) postrojenje. Postoji dvofazni protok, točnije slana voda i para su odvojene, pomoću geotermalne BOP opreme te su tada isporučene u ORC postrojenje kako bi se proizvodila električna energija. Nakon izmjene topline s radnim medijem, geotermalni fluid se ponovno ubrizguje u rezervoar. Izmjenjivači topline hlade slanu vodu i kondenziraju paru. Radni medij koji se koristi za zagrijavanje i isparavanje je izobutan. Para pokreće 5-stupanjsku aksijalnu turbinu za proizvodnju 17,5 MW<sub>e</sub> električne energije. Ispušni plinovi turbine se odvede u rekuperator, nakon rekuperatora ORC fluid (radni medij) se kondenzira pomoću zračnog kondenzatora. Crpke ORC postrojenja, utiskuju izobutanski kondenzat nazad u sustav i završavaju zatvoreni ORC krug [26]. U tablici 5.5. prikazani su podaci proizvodne bušotine geotermalne elektrane Velika 1.

**Tablica 5.5.** Podaci proizvodne bušotine Velika Ciglena-1 Alfa

<b>Status bušotine</b>	<b>Proizvodna</b>
Nadmorska visina	127 m
Geotermalni gradijent	5,7 °C/100m
Maksimalna izmjerena temperatura	180 °C
<b>Naziv kolone</b>	<b>Velika Ciglena-1 Alfa</b>
Kratica	VC-1A
Godina bušenja	1990.
Konačna dubina	2956 m

Podaci s mjerenja	
Vrsta mjerenja	DST-2
Interval mjerenja	2568m-2633m
Protok	347,48 l/s
Temperatura	98 °C

## 5.2. Tehno-ekonomski proračun geotermalne elektrane Velika 1

LCOE (Levelized Cost of electricity) odnosno nivelirani troškovi proizvodnje električne energije su proračun koji se koristi za procjenu odabira elektrana za izgradnju prema njihovoj isplativosti. Proračun je temeljen na niveliranom trošku (kWh), a izračunava se prema metodi ekvivalentne sadašnje vrijednosti i izražen je u novčanoj jedinici po kWh, a njegov je izraz dan prema [27]:

$$LCOE = \frac{\sum_{k=-j}^n I_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TP_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TG_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TE_k \cdot (1+i)^{-k} + \sum_{k=1}^n TD_k \cdot (1+i)^{-k}}{\sum_{k=1}^n W_k \cdot (1+i)^{-k}} \quad (5-1)$$

gdje je:

- $I_k$  – investicija izvršena u k-toj godini (n.j.),
- $TP_k$  – troškovi pogona u k-toj godini (n.j.),
- $TG_k$  – nabavni troškovi za gorivo u k-toj godini (n.j.),
- $TE_k$  – troškovi emisije ( $CO_2$ ) u k-toj godini (n.j.),
- $TD_k$  – troškovi dekomisije postrojenja u k-toj godini (n.j.),
- $W_k$  – energija proizvedena u k-toj godini (kWh),
- $i$  – diskontna stopa konstantna u promatranom razdoblju,
- $j$  – vrijeme izgradnje (god),
- $n$  – životni vijek (god) [27].

Proračun LCOE-a će biti izrađen za geotermalnu elektranu Velika 1, ona je najveća elektrana u kontinentalnoj Europi s binarnom tehnologijom i njena investicija je iznosila 325 milijuna kuna, kada se to pretvori u eure iznosi 43.134.912,73€ prema fiksnom tečaju konverzije od  $1€ = 7,53450$  kn. Izgradnja geotermalne elektrane Velike 1 trajala je dvije godine [28].



Troškovi pogona i održavanja iznose između 0,0091 € do 0,027 € po kWh, te će se za potrebe proračuna koristiti 0,018 € po kWh, odnosno srednja vrijednost [29]. Prema autoru iz [27] troškovi pogona iznose:

$$TP_k = tp_k \cdot W_k \quad (5-2)$$

gdje je:

- $tp_k$  – trošak pogona i održavanja po jedinici snage (€/kWh)
- $W_k$  – energija proizvedena u godini (kWh)

Energija proizvedena u godini dobiva se umnoškom faktora iskorištenja, brojem sati u godini i instalirane snage [27]:

$$W_k = m_{k,inst} \cdot 8760 \cdot P_{inst} \quad (5-3)$$

Kada se uvrste vrijednosti u jednadžbu (5-3) dobiva se energija proizvedena u godini:

$$W_k = 0,86 \cdot 8.760 \text{ h} \cdot 17.500 \text{ kWh} = 131.838.000 \text{ kWh} = 131.838 \text{ MWh}$$

Energija proizvedena u godini iznosi 131.838.000 kWh, uz faktor iskorištenja od 0,86 [30].

Kada se energija proizvedena u godini uvrsti u izraz (5-2) dobivaju se troškovi pogona i oni iznose:

$$TP_k = 0,018 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \cdot 131.838.000 \text{ kWh} = 2.373.084 \text{ €}$$

Prema [30] „overnight costs“ iznosi  $T_{on} = 6.077,75 \text{ €/kW}$  za geotermalnu elektranu instalirane snage 19 MW, što je približno instaliranoj snazi geotermalne elektrane Velika 1 od 17,5 MW, budući da nisu dostupni relevantni podaci o geotermalnoj elektrani Velika 1.

„Overnight costs“ omogućuje izračunavanje troškova dekomisije geotermalne elektrane [30]:

$$TD_k = 5\% \cdot T_{on} \quad (5-4)$$

Kada se u izraz (5-4) uvrste podaci dobivaju se troškovi dekomisije koji iznose:

$$TD_k = 0,05 \cdot 6,077,75 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 303,89 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Vrijeme izgradnje geotermalne elektrane je dvije godine, a životni vijek 40 godina [30]. LCOE će biti izračunat uz diskontne stope od 3%, 7% i 10%. Prvo će se izračunati investicijski troškovi koji se izračunavaju samo za dvije godine jer je toliko trajala izgradnja geotermalne elektrane Velika 1, pri diskontnoj stopi  $k = 0,03$ :

$$\sum_{k=-j}^{-1} I_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=-2}^{-1} 43.141.912,73 \cdot (1+0,03)^{-k} = 90.190.789,03 \text{ €}$$

Diskontirani troškovi investicije za diskontnu stopu od 3% iznose 90.205.425,33€. Prilikom izračuna diskontnog troška investicije za diskontnu stopu od 7%, vrijednost  $k$  se postavlja na  $k=0,07$ , te ona iznosi:

$$\sum_{k=-j}^{-1} I_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=-2}^{-1} 43.141.912,73 \cdot (1+0,07)^{-k} = 95.539.518,21 \text{ €}$$

Za diskontnu stopu od 10% diskontni troškovi investicije iznose pri  $k=0,1$ :

$$\sum_{k=-j}^{-1} I_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=-2}^{-1} 43.141.912,73 \cdot (1+0,1)^{-k} = 99.641.648,41 \text{ €}$$

Sljedeći diskontni troškovi koji se izračunavaju su operativni troškovi (traju čitav životni vijek elektrane) i oni za diskontnu stopu od 3% iznose:

$$\sum_{k=1}^n TP_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,03)^{-k} = 54.853.295,54 \text{ €}$$

Za diskontnu stopu od 7% oni iznose:

$$\sum_{k=1}^n TP_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,07)^{-k} = 31.637.264,95 \text{ €}$$

Te za diskontnu stopu od 10% oni iznose:

$$\sum_{k=1}^n TP_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,1)^{-k} = 23.206.508,8 \text{ €}$$

Troškovi goriva i emisije  $CO_2$  za sve diskontne stope iznose 0 €. Preostali su još samo troškovi dekomisije koji se javljaju samo u posljednjoj godini, te se oni odnose na zbrinjavanje otpada, obnavljanje zemljišta i slične aktivnosti. Dekomisijski troškovi za diskontnu stopu od 3% iznose:

$$\sum_{k=1}^n TD_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=40}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,03)^{-k} = 93,16 \text{ €}$$

Za diskontnu stopu od 7% iznose:

$$\sum_{k=1}^n TD_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=40}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,07)^{-k} = 20,29 \text{ €}$$

Te za diskontnu stopu od 10%:

$$\sum_{k=1}^n TD_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=40}^{40} 2.373.084 \cdot (1+0,1)^{-k} = 6,71 \text{ €}$$

Diskontni troškovi proizvodnje električne energije se računaju za čitav životni vijek rada elektrane i uz diskontnu stopu od 3% iznose

$$\sum_{k=1}^n W_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 131.838.000 \cdot (1+0,03)^{-k} = 3.047.405.308 \text{ €}$$

Za diskontnu stopu od 7% iznose:

$$\sum_{k=1}^n W_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 131.838.000 \cdot (1+0,07)^{-k} = 1.757.625.830 \text{ €}$$

A za diskontnu stopu od 10% iznose:

$$\sum_{k=1}^n W_k \cdot (1+i)^{-k} = \sum_{k=1}^{40} 131.838.000 \cdot (1+0,1)^{-k} = 1.289.250.489 \text{ €}$$

Budući da su svi potrebni podaci prikupljeni, te da je poznato da su troškovi goriva i emisije  $CO_2$  za sve diskontne stope 0 €, moguće je izračunati LCOE-e geotermalne elektrane Velika 1 uz diskontne stope za 3%, 7% i 10% prema izrazu (5-1):

$$LCOE_{3\%} = \frac{90.190.789,03 + 54.853.295,54 + 0 + 0 + 93,16}{3.047.405.308} = 0,0476 \text{ €/kWh}$$

LCOE za diskontnu stopu iznosi 0,0476 €/kWh odnosno 47,6 €/MWh. LCOE za diskontnu stopu od 7% tada je:

$$LCOE_{7\%} = \frac{95.539.518,21 + 31.637.264,95 + 0 + 0 + 20,29}{1.757.625.830} = 0,0724 \text{ €/kWh}$$

LCOE za diskontnu stopu od 7% iznosi 0,0724 €/kWh što je 72,4 €/MWh. Također LCOE za diskontnu stopu od 10% će iznositi:

$$LCOE_{10\%} = \frac{99.641.648,41 + 23.206.508,8 + 0 + 0 + 6,71}{1.289.250.489} = 0,0953 \text{ €/kWh}$$

LCOE za diskontnu stopu od 10% iznosi 0,0953 €/kWh odnosno 95,3 €/MWh.

Analiziran je „Levelized Cost of Energy“ LCOE za geotermalnu elektranu Velika 1 pri različitim diskontnim stopama od 3%, 7% i 10%. LCOE prikazuje ključan pokazatelj pomoću kojega se procjenjuju prosječni troškovi proizvodnje električne energije tijekom životnog vijeka postrojenja, u obzir se uzimaju svi relevantni troškovi (investicijski, operativni, dekomisijski). Analizom se došlo do zaključka da se LCOE povećava povećanjem diskontne stope. Pri diskontnoj stopi od 3% LCOE iznosi 0,0476 €/kWh, dok pri diskontnim stopama od 7% i 10% LCOE raste na 0,0724 €/kWh i 0,0953 €/kWh. Rezultati su prikazali da povećanje diskontne stope značajno povećava troškove proizvodnje električne energije.

Upravo zato diskontna stopa predstavlja ključan faktor u financijskim analizama u dugoročnim projektima poput energetske postrojenja. Prikazuje vremensku vrijednost novca, točnije činjenicu da će novčani tokovi u budućnosti biti manje vrijedni od novčanih tokova danas. Često diskontna stopa prikazuje troškove kapitala, rizik projekta i makroekonomske uvjete. Iz rezultata se može zaključiti izrazita važnost procjene i primjene diskontne stope u analizi troškova proizvodnje električne energije iz razloga da odluke budu informirane i održive u energetske sektoru.

Procjena isplativosti će se dodatno analizirati pomoću dijagrama novčanog tijeka geotermalne elektrane Velika 1 za diskontnu stopu od 3%.

LCOE geotermalne elektrane Velika 1 za diskontnu stopu od 3% sadrži:

- diskontirane investicijske troškove  $I_k = 90.190.789,03 \text{ €}$
- diskontirane operativne troškove  $TP_k = 54.853.295,54 \text{ €}$
- diskontirane dekomisijske troškove  $TD_k = 93,16 \text{ €}$
- godišnju proizvodnju  $W_k = 131.838.000 \text{ kWh}$
- životni vijek  $n = 40$  godina.

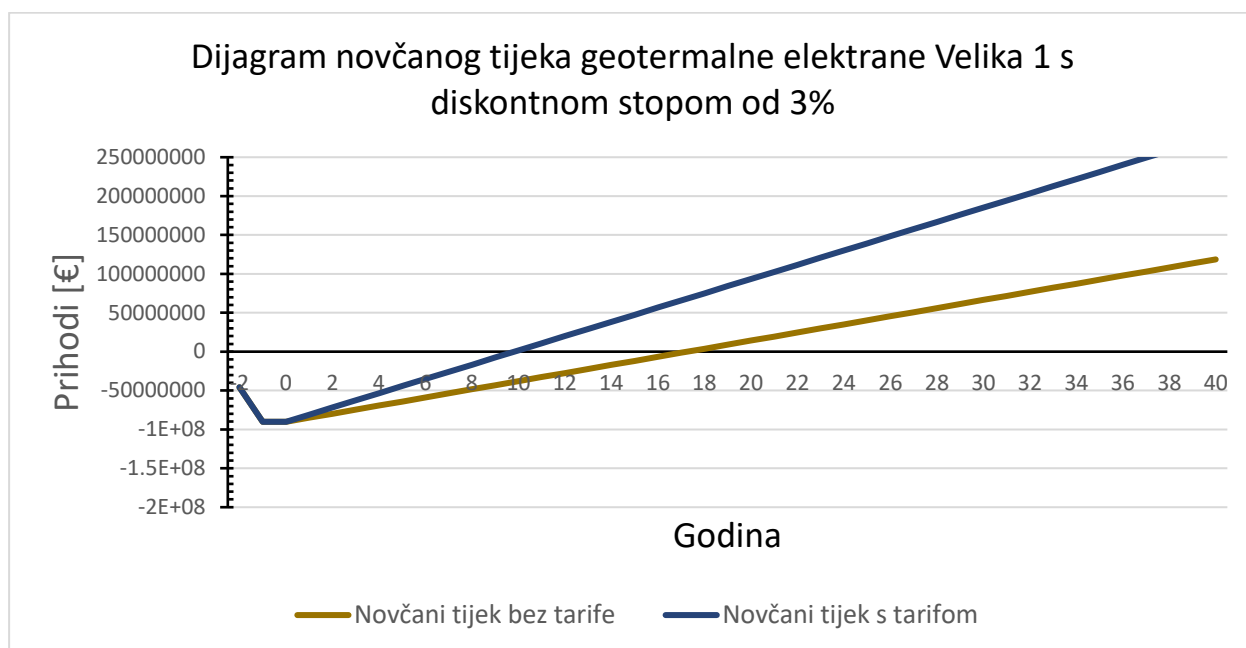
Pretpostavljena cijena proizvedene električne energije s minimalnom prodajnom cijenom bez tarife je  $c_{mt} = 0,05 \text{ €/kWh}$ , te se ona množi s godišnjom proizvodnjom. Ukoliko se od umnoška oduzmu operativni troškovi (pretpostavka je da se troškovi dijele ravnomjerno za životnog vijeka) može se dobiti neto prihod u godini:

$$C_{mt1-39} = (W_k \cdot c_{mt}) - \frac{TP_k}{n} = \left( 131.838.000 \text{ kWh} \cdot 0,05 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right) - \left( \frac{54.853.295,54}{40} \right) \\ = 5.220.567,61 \text{ €}$$

$C_{mt1-39}$  je neto godišnji prihod geotermalne elektrane Velika 1 kroz 40 godina (odnosno do 39 godine), budući da se u zadnjoj godini rada geotermalne elektrane plaćaju i dekomisijski troškovi zadnji neto prihod će izgledati:

$$C_{mt40} = C_{mt1-39} - TD_k = 5.220.567,61 \text{ €} - 93,16 \text{ €} = 5.220.474,45 \text{ €}$$

Svi potrebni podaci su prikupljeni i može se izračunati novčani tijek geotermalne elektrane Velika 1. Za prve dvije godine novčani tijek je negativan, odnosno u prvoj godini izgradnje se uložilo 45.761.828,92 €, a u drugoj godini još 44.428.960,11 € što u sumi daje ulog od 90.190.789,03 €. Ostatak proračuna analize novčanog tijeka je iterativna metoda od 40 iteracija, gdje se neto prihod proizvodnje električne energije u godini zbraja s negativnim diskontiranim troškom investicije sve do 40-te godine kada se ukupnom novčanom prihodu dodaje i neto godišnji prihod proizvodnje električne energije umanjen za dekomisijski trošak, te tada iznosi  $C_{mt40} = 5.220.474,45 \text{ €}$  i na taj način završava iterativni proračun novčanog tijeka te ga je moguće prikazati dijagramom.



**Slika 5.3.** Novčani tijek geotermalne elektrane s minimalnom prodajnom cijenom bez tarife i s tarifom

Na slici 5.3. prikazan je dijagram novčanog tijeka za slučaj s minimalnom prodajnom cijenom bez tarife koja je označena žutom bojom i novčani tijek s tarifom koji je prikazan plavom bojom, proračuni su gotovo identični, razlika je u prodajnoj cijeni električne energije (iz tog razloga postoji različit neto godišnji prihod). Za potrebe proračuna za minimalnu prodajnu cijenu korištena je  $c_{mt} = 0,05 \text{ €/kWh}$ , a prodajna cijena s poticajem, odnosno tarifom iznosila je  $c_{pt} = 0,08 \text{ €/kWh}$ . Može se zaključiti da je povrat investicije znatno brži ukoliko se radi o prodajnoj cijeni s tarifom, odnosno s određenim poticajem koji može biti za obnovljive izvore energije (veći neto godišnji prihod). Proračunski i grafički je dokazano da investicija s minimalnom prodajnom cijenom bez tarife postaje isplativa u osamnaestoj godini rada geotermalne elektrane Velika 1, ukoliko je riječ o prodajnoj cijeni s „poticajem“ odnosno tarifom investicija je znatno brže isplaćena i na grafu je vidljivo da je to deseta godina.

U tablici 5.6. je prikazan novčani tijek geotermalne elektrane Velika 1 te su označene (podebljane) godine u kojima investicija postaje isplativa.

**Tablica 5.6.** Proračun novčanog tijeka geotermalne elektrane Velika 1

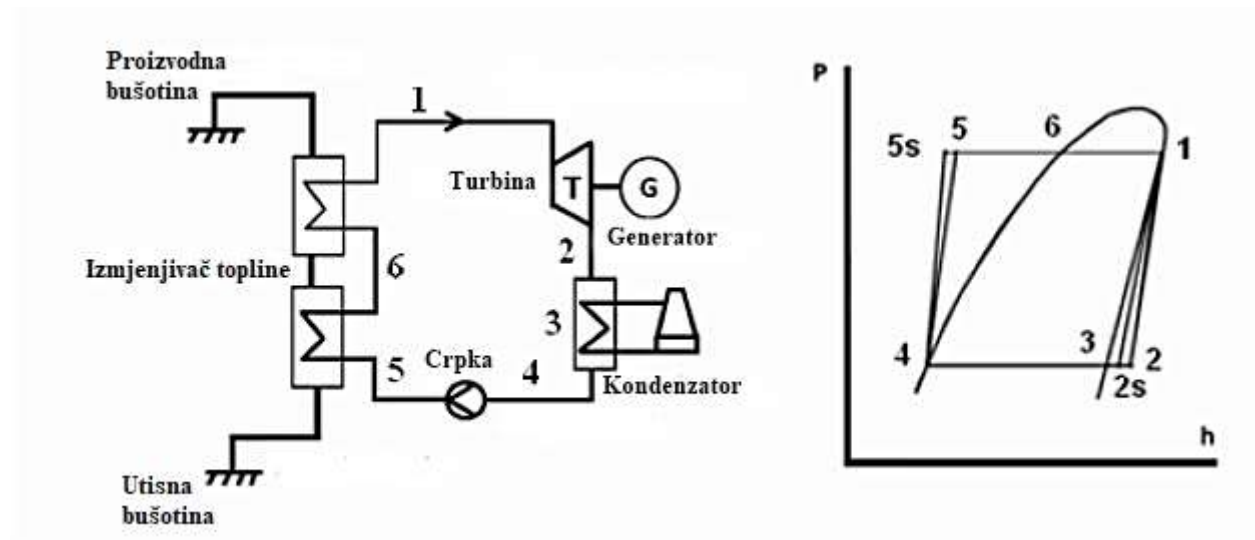
Godina	Neto zarada bez tarife [€]	Neto zarada s tarifom [€]	Novčani tijek bez tarife [€]	Novčani tijek s tarifom [€]
-2	-90.190.789,03	-90.190.789,03	-45.761.828,92	-45.761.828,92
-1	-90.190.789,03	-90.190.789,03	-90.190.789,03	-90.190.789,03
0	-90.190.789,03	-90.190.789,03	-90.190.789,03	-90.190.789,03
1	5.220.567,61	9.175.707,61	-84.970.221,42	-81.015.081,42
2	5.220.567,61	9.175.707,61	-79.749.653,81	-71.839.373,81
3	5.220.567,61	9.175.707,61	-74.529.086,20	-62.663.666,20
4	5.220.567,61	9.175.707,61	-69.308.518,86	-53.487.958,59
5	5.220.567,61	9.175.707,61	-64.087.950,98	-44.312.250,98
6	5.220.567,61	9.175.707,61	-58.867.383,37	-35.136.543,37
7	5.220.567,61	9.175.707,61	-53.646.815,76	-25.960.835,76
8	5.220.567,61	9.175.707,61	-48.426.248,15	-16.785.128,15
9	5.220.567,61	9.175.707,61	-43.205.680,54	-7.609.420,54
<b>10</b>	<b>5.220.567,61</b>	<b>9.175.707,61</b>	<b>-37.985.112,93</b>	<b>1.566.287,07</b>
11	5.220.567,61	9.175.707,61	-32.764.545,32	10.741.994,68
12	5.220.567,61	9.175.707,61	-27.543.977,71	19.917.702,29
13	5.220.567,61	9.175.707,61	-22.323.410,10	29.093.409,90
14	5.220.567,61	9.175.707,61	-17.102.842,49	38.269.117,51
15	5.220.567,61	9.175.707,61	-11.882.274,88	47.444.825,12
16	5.220.567,61	9.175.707,61	-6.661.707,27	56.620.532,73
17	5.220.567,61	9.175.707,61	-1.441.139,66	65.796.240,34
<b>18</b>	<b>5.220.567,61</b>	<b>9.175.707,61</b>	<b>3.779.427,95</b>	<b>74.971.947,95</b>
19	5.220.567,61	9.175.707,61	8.999.995,56	84.147.655,56
20	5.220.567,61	9.175.707,61	14.220.563,17	93.323.363,17

Proračunska i grafička analiza prikazuju da je poticaj odnosno tarifa izrazito važna za povrat stope investicije, veća tarifa rezultira manjim brojem godina u kojima se investicija isplati.

### 5.3. Termodinamički stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1

Geotermalna elektrana Velika 1 je prva geotermalna elektrana u Hrvatskoj, a predstavlja najveću geotermalnu elektranu s binarnim ciklusom (Organski Rankienov ciklus) u kontinentalnoj Europi.

Na slici 5.4. prikazan je dijagram ciklusa i p-h dijagram Organskog Rankienovog ciklusa (ORC-a).



**Slika 5.4.** Dijagram ciklusa i p-h dijagram Organskog Rankienovog ciklusa [31]

Na p-h dijagramu na slici 5.4. unutar ciklusa dolazi do pregrijavanja i isparavanja radnog fluida u izmjenjivaču topline. U točki 1, zasićena para radnog fluida dolazi do turbine gdje se odvija proces ekspanzije, para se širi i okreće lopatice turbine koje pokreću električni generator zaslužan za proizvodnju električne energije. Para u točki 2 odlazi iz turbine poslije idealne adijabatske (izentropske) ekspanzije, tada para nižeg tlaka i temperature ulazi u kondenzator. U kondenzatoru se pregrijana para hladi do zasićene točke 3 i postiže potpuno tekuće stanje, u točki 4 para radnog fluida se hladi rashladnom vodom u kondenzatoru. Zasićen radni fluid u tekućem obliku ponovno dolazi u ciklus i crpi se natrag u izmjenjivač topline s točke 4 na točku 5., odnosno ovdje se odvija adijabatska (izentropska) kompresija u crpkama [31]. Ukoliko bi se u obzir uzimale točke 2s i 5s radilo bi se o idealnom ciklusu.

U stvarnom ciklusu su prikazane neke neučinkovitosti sustava (što u idealnom ciklusu nije slučaj), kao što su gubici u pumpi i turbini, ali i neki dodatni gubitci nastali zbog curenja ili nedostataka. Radi tih gubitaka postoje odstupanja od idealnog ciklusa, a rezultiraju nižim stupnjem djelovanja stvarnog ORC ciklusa u odnosu na idealni ORC ciklus.



Kako bi se mogao izračunati stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1, potrebni su sljedeći podaci prikazani u tablici 5.7.

**Tablica 5.7.** Rezultati proračuna za ORC ciklus geotermalne elektrane Velika 1 [32]

Geotermalno polje	Velika 1
Radni medij	Izopentan
$\dot{m}_{wf}$ [kg/s]	80,13
$p_{max}$ [MPa]	0,9
$p_{min}$ [MPa]	0,11
$\dot{Q}_1$ [kW]	37.422,10
$\dot{Q}_2$ [kW]	32.174,50
$\dot{W}_T$ [kW]	5.400
$\dot{W}_{FP}$ [kW]	130
$\dot{W}_{net}$ [kW]	5.270

Gdje je:

- $\dot{m}_{wf}$  – protočna masa radnog fluida,
- $p_{max}$  – maksimalni tlak u sustavu,
- $p_{min}$  – minimalni tlak u sustavu,
- $\dot{Q}_1$  – toplinska energija dovedena u sustav,
- $\dot{Q}_2$  – toplinska energija odvedena iz sustava,
- $\dot{W}_T$  – rad turbine,
- $\dot{W}_{FP}$  – rad potrošen crpkom,
- $\dot{W}_{net}$  – neto izlazni rad [32].

Prema autoru iz [32] stupanj djelovanja ORC ciklusa geotermalne elektrane Velika 1 može se izračunati sljedećim izrazom:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_1} \quad (5-5)$$

Kada se u izraz (5-5) uvrste podaci iz tablice 5.7. dobiva se:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_1} = \frac{5.270 \text{ kW}}{37.422,10 \text{ kW}} = 0,1408 \cdot 100\% = 14,08\%$$

Stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1 iznosi 14,08%.

Autor u literaturi [32] prikazao je još jedan način na koji je moguće izračunati stupanj djelovanja ORC ciklusa:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \quad (5-6)$$

Ukoliko se u izraz (5-6) uvrste potrebni podaci iz tablice 5.7. dobiva se:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 1 - \frac{32.174,50 \text{ kW}}{37.442,10 \text{ kW}} = 0,1407 \cdot 100\% = 14,07\%$$

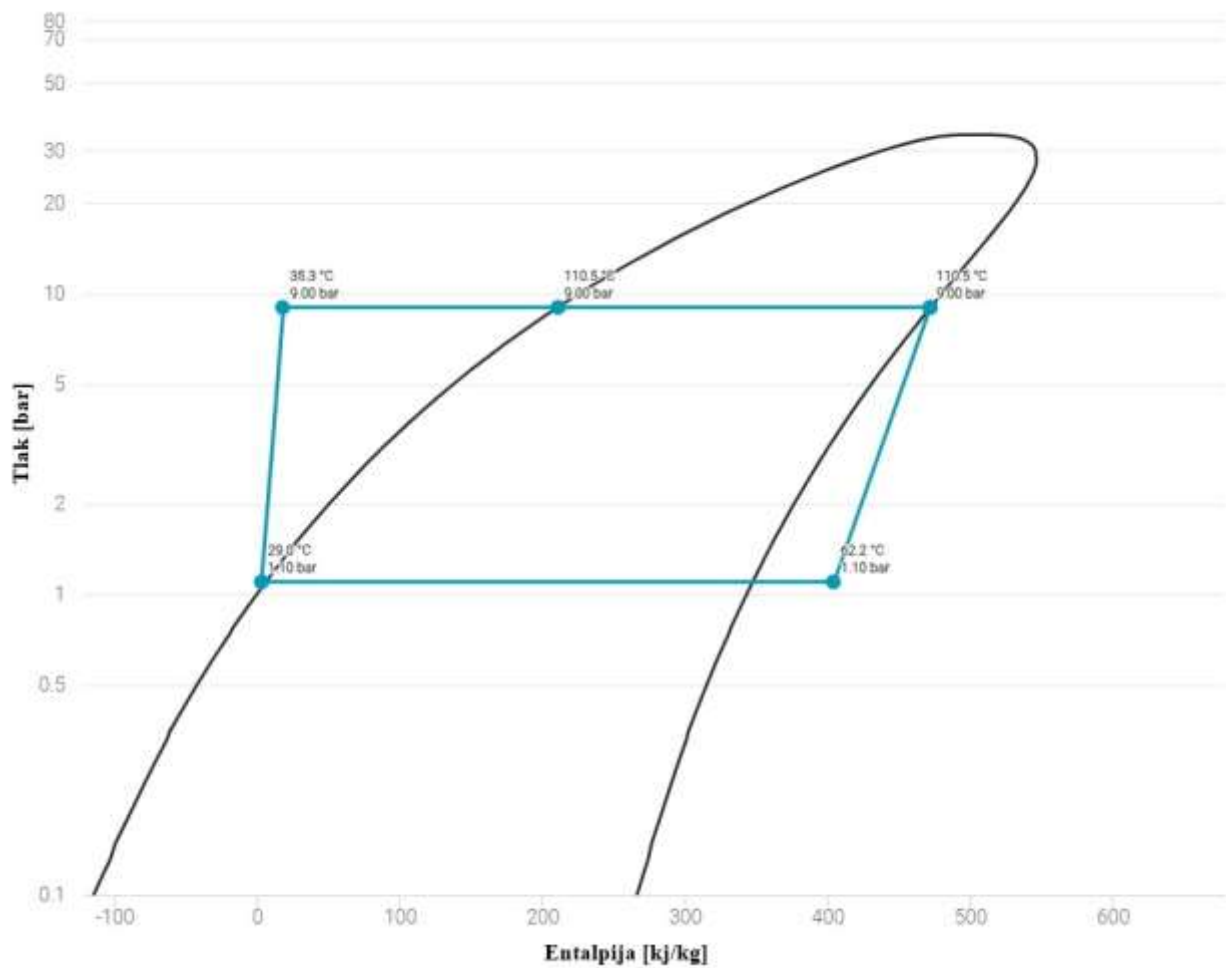
Zaključuje se da izraz (5-5) i izraz (5-6) rezultiraju približno jednakim vrijednostima stupnja djelovanja geotermalne elektrane Velika 1, koji iznosi 14,1% prema autoru iz [32].

U tablici 5.8. prikazana su stanja radnog fluida i geotermalne vode u karakterističnim točkama Organskog Rankienovog ciklusa u geotermalnoj elektrani Velika 1:

**Tablica 5.8.** Stanja radnog fluida i geotermalne vode geotermalne elektrane Velika 1 [32]

Točka	Medij	$\dot{m}$ [kg/s]	$T$ [K]	$p$ [MPa]	$h$ [kJ/kg]	$s$ [kJ/kgK]
1	izopentan	80,13	383,55	0,90	471,59	1,29
2	izopentan	80,13	335,23	0,11	404,20	1,33
3	izopentan	80,13	302,14	0,11	2,67	0,01
4	izopentan	80,13	305,58	0,90	17,98	0,01
5	izopentan	80,13	383,55	0,90	210,70	0,57
6	geotermalna voda	83,00	448,20	2,00	741,82	2,09
7	geotermalna voda	83,00	448,20	7,00	744,48	2,08
8	geotermalna voda	83,00	389,30	7,00	492,34	1,48
9	geotermalna voda	83,00	342,20	7,00	294,80	0,94

Na temelju tablice 5.8. nacrtan je p-h dijagram ORC ciklusa geotermalne elektrane Velika 1, dijagram je prikazan na slici 5.5.



**Slika 5.5.** p-h dijagram Organskog Rankienovog ciklusa geotermalne elektrane Velika 1

ORC ciklus se koristi u sustavima u kojima su geotermalni izvori niske do umjerene temperature, u koje spada i geotermalna elektrana Velika 1. Upotreba izopentana u takvim procesima povećava učinkovitost zbog svojih termodinamičkih svojstava. Izopentan ima nisku točku vrenja i nije toksičan.

Zaključuje se da je stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1 unutar očekivanih granica koje iznose od 10% do 20% za geotermalne elektrane s Organskim Rankienovim ciklusom.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu istražen je razvoj geotermalnih elektrana s naglaskom na tehnologije, opremu i materijale koji se koriste u njihovoj izgradnji i samom radu. Detaljno su proučene različite vrste geotermalnih elektrana, uključujući one na suhu paru, sa separiranjem pare i s binarnim ciklusom. Prikazane su prednosti i nedostaci geotermalnih elektrana, kao i njihov utjecaj na okoliš te prilike za razvoj u Hrvatskoj i svijetu.

Rezultati istraživanja prikazuju znatan napredak tehnologija koje se koriste za geotermalne elektrane. Razvoj materijala geotermalne opreme rezultirao je učinkovitijim, dugovječnijim i stabilnijim radom svake komponente geotermalne elektrane koja radi u izrazito zahtjevnim uvjetima rada. Razvoj i unapređenje geotermalne opreme ključno je za optimizaciju učinkovitosti i smanjenje troškova proizvodnje električne energije iz geotermalnih izvora.

Proračunski dio rada se sastoji od analize potencijala geotermalnih izvora u Hrvatskoj, tehn-ekonomskog proračuna za geotermalnu elektranu Velika 1 i proračuna termodinamičkog stupnja djelovanja geotermalne elektrane Velika 1.

Analiza potencijala geotermalnih izvora prikazuje da u Hrvatskoj postoji znatan broj geotermalnih bušotina koje bih se mogle iskoristiti za proizvodnju električne energije. Najveći broj potencijalnih geotermalnih bušotina iskoristivih za proizvodnju električne energije se proteže područjem uz rijeku Dravu.

Tehno-ekološki proračun (proračun LCOE-a) izveden je za tri diskontne stope od 3%, 7% i 10%, zbog nedostatka svih relevantnih podataka korišteni su podaci koji su specifični za geotermalne elektrane s podacima koji su dostupni za geotermalnu elektranu Velika 1, zaključuje se da je LCOE znatno veći s povećanjem diskontne stope. Tehno-ekonomski proračuni moraju biti detaljno i precizno provedeni kako bih procjena troškova proizvodnje električne energije bila što točnija.

Termodinamički stupanj djelovanja je izračunat prema podacima dostupnim i odgovarajućim za geotermalnu elektranu Velika 1. Stupanj djelovanja geotermalne elektrane Velika 1 je 14,1% što odgovara s globalnim standardima za geotermalne sustave s Organskim Rankineovim ciklusom.

Geotermalne elektrane predstavljaju stabilno i ekološki prihvatljivo rješenje za proizvodnju električne energije, ali uz velik potencijal za daljnji razvoj i napredak. Budući razvoj te odgovarajuće tehnološke inovacije i ulaganja u geotermalne tehnologije doprinijeti će energetske neovisnosti geotermalnih elektrana.

## LITERATURA

- [1] „International Renewable Energy Agency : Geothermal power Technology brief“ [online]. Dostupno na: <https://www.irena.org/publications/2017/Aug/Geothermal-power-Technology-brief>. [Pristupljeno: 19.4.2024.].
- [2] „International Renewable Energy Agency : Global geothermal market and technology assessment“ [online], 16-velj-2023. Dostupno na: <https://www.irena.org/Publications/2023/Feb/Global-geothermal-market-and-technology-assessment>. [Pristupljeno: 15.4.2024.].
- [3] „SETIS - SET Plan information system : Deep geothermal heat and power in the European Union“ [online]. Dostupno na: [https://setis.ec.europa.eu/deep-geothermal-heat-and-power-european-union\\_en](https://setis.ec.europa.eu/deep-geothermal-heat-and-power-european-union_en). [Pristupljeno: 21.5.2024.].
- [4] C., Tong, *Introduction to Materials for Advanced Energy Systems*. Springer: SAD, 2019.
- [5] D., Šljivac, D., Topić, *Obnovljivi izvori električne energije*. Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek: Osijek, 2018.
- [6] „Wikipedia : Structure of the Earth - Simple English, the free encyclopedia“ [online]. Dostupno na: [https://simple.wikipedia.org/wiki/Structure\\_of\\_the\\_Earth](https://simple.wikipedia.org/wiki/Structure_of_the_Earth). [Pristupljeno: 7.4.2024.].
- [7] „National Renewable Energy Laboratory | Full Steam Ahead: Unearthing the Power of Geothermal“ [online]. Dostupno na: <https://www.nrel.gov/news/features/2023/full-steam-ahead-unearthing-the-power-of-geothermal.html>. [Pristupljeno: 7.4.2024.].
- [8] „HRASTOVIĆ INŽENJERING d.o.o : Geotermalne Elektrane“ [online]. Dostupno na: <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/elektricna-energija/geotermalne-elektrane.html>. [Pristupljeno: 8.4.2024.].
- [9] „Hrvatska tehnička enciklopedija : Geotermalna voda“ [online]. Dostupno na: <https://tehnika.lzmk.hr/geotermalna-voda/>. [Pristupljeno: 8.4.2024.].
- [10] „Obnovljivi.com : Načini pretvorbe geotermalne energije u električnu energiju - Geotermalne elektrane sa suhom parom“ [online]. Dostupno na: <https://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju?start=1>. [Pristupljeno: 10.4.2024.].
- [11] M., Gugić, „Geotermalne elektrane sa separiranjem pare“, Završni rad, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2017.
- [12] „Think Geoenergy : ThinkGeoEnergy’s Top 10 Geothermal Countries 2023 – Power Generation Capacity“ [online]. Dostupno na: <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2023-power-generation-capacity/>. [Pristupljeno: 18.4.2024.].
- [13] „Enerkon : Geotermalna elektrana „Velika 1““ [online]. Dostupno na: <https://www.enerkon.hr/geotermalna-elektrana-velika-1-10-mwel/>. [Pristupljeno: 19.4.2024.].
- [14] „NASA : Technology Readiness Levels“ [online]. Dostupno na: <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>. [Pristupljeno: 22.5.2024.].
- [15] „Mitsubishi Power | Steam Turbines for Geothermal Power Plants“ [online]. Dostupno na: <https://power.mhi.com/products/steamturbines/lineup/geothermal>. [Pristupljeno: 10.6.2024.].
- [16] „SIEMENS ENERGY : Steam Turbines for Geothermal Power Plants : SST-400 GEO and SST-500 GEO with Power Output up to 120 MW“. Siemens AG Energy Sector, 2013.
- [17] „Fuji Electric Global | Geothermal Power Generation“ [online]. Dostupno na: [https://www.fujielectric.com/products/energy/geothermal\\_power\\_generation/](https://www.fujielectric.com/products/energy/geothermal_power_generation/). [Pristupljeno: 27.6.2024.].

- [18] „Ansaldo Energia | Geothermal plants“ [online]. Dostupno na: <https://www.ansaldoenergia.com/offering/power-plants/default-title>. [Pristupljeno: 2.7.2024.].
- [19] „Siemens Energy | SGen-1000A generator series“ [online]. Dostupno na: <https://www.siemens-energy.com/content/siemensenergy-aem/global/en/home/products-services/product/sngen-100a.html#SGen-1000A-series-tab-10>. [Pristupljeno: 15.7.2024.].
- [20] „Ansaldo Energia | Generators“ [online]. Dostupno na: <https://www.ansaldoenergia.com/offering/equipment/generators>. [Pristupljeno: 15.7.2024.].
- [21] „Mitsubishi Power | Generators“ [online]. Dostupno na: <https://power.mhi.com/products/generators>. [Pristupljeno: 15.7.2024.].
- [22] „Kelvion | Heat exchangers for renewable energy applications“ [online]. Dostupno na: <https://www.kelvion.com/industries/market/renewable-energy/>. [Pristupljeno: 17.7.2024.].
- [23] „Schlumberger | SLB, a global technology company“ [online]. Dostupno na: <https://www.slb.com/>. [Pristupljeno: 17.7.2024.].
- [24] „Agencija za ugljikovodike | Objavljena interaktivna karta geotermalnog potencijala“ [online]. Dostupno na: <https://www.azu.hr/hr-hr/novosti/objavljena-interaktivna-karta-geotermalnog-potencijala/>. [Pristupljeno: 23.7.2024.].
- [25] B., Režek, Z., Komerički, Bruketa Nikola, „GEOTERMALNI PROGRAM KUTNJAK – LUNJKOVEC KAO DEMONSTRACIJSKI PRIMJER UPORABE GEOTERMALNE ENERGIJE U REPUBLICI HRVATSKOJ“. HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNE ELEKTRODISTRIBUCIJSKE KONFERENCIJE, 2010.
- [26] „TURBODEN | ORC turbogenerator for MB Holding“ [online]. Dostupno na: <https://www.turboden.com/case-histories/1455/geo-power-energy-development-doo>. [Pristupljeno: 18.7.2024.].
- [27] D., Šljivac, „PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE“. Zavod za elektroenergetiku | Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.
- [28] „Ministarstvo gospodarstva - Otvorena prva geotermalna elektrana u Hrvatskoj - Velika 1“ [online]. Dostupno na: <https://mingo.gov.hr/vijesti/otvorena-prva-geotermalna-elektrana-u-hrvatskoj-velika-1/5635>. [Pristupljeno: 5.8.2024.].
- [29] „Geothermal Electricity | Cost and Economic Development“ [online]. Dostupno na: <https://sites.lafayette.edu/egrs352-sp14-geothermal/contexts-and-consequences/cost/>. [Pristupljeno: 5.8.2024.].
- [30] „Projected Costs of Generating Electricity“. International Energy Agency and Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency, 2020.
- [31] M., Kukurugyova, J., Nalevankova, A., Gulden Gocken, R., Dzurnak, „Comparison of Working Fluids for ORC Geothermal Power Plant Ďurkov“. Department of Furnaces and Thermal Technology, Technical University of Košice, Letná 9, 420 00 Košice, Slovakia, 2015.
- [32] Z., Guzović, P., Rašković, Z., Blatarić, „The comparison of a basic and a dual-pressure ORC (Organic Rankine Cycle): Geothermal Power Plant Velika Ciglena case study“. University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, Zagreb, Croatia, 2014.

## SAŽETAK

Diplomski rad istražuje trenutni razvoj tehnologija geotermalnih elektrana, s posebnim naglaskom na važnost implementacije obnovljivih izvora energije poput geotermalne energije, zbog njezine neiscrpivosti. Rad se sastoji od tri glavna dijela: teorijskog, istraživačkog i proračunskog.

U teorijskom dijelu opisana je geotermalna energija i geotermalne elektrane, uključujući različite tipove elektrana poput onih na suhu paru, sa separiranjem pare i s binarnim ciklusom. Analizirani su uvjeti potrebni za uspješnu izgradnju geotermalnih elektrana, rizici ulaganja te utjecaj na okoliš. Također je prikazano trenutno stanje instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana u svijetu i Hrvatskoj, uz razmatranje njihovih prednosti, nedostataka i troškova.

Istraživački dio rada usredotočen je na suvremeno stanje tehnologija geotermalnih elektrana. Iskazane su razine tehnološke spremnosti (TRL) ključnih dijelova geotermalnih elektrana te su navedeni najvažniji proizvođači suvremene geotermalne opreme. Proučeni su vodeći proizvođači geotermalne opreme i njihove specifikacije, poseban naglasak je na odabiru materijala za optimalan rad geotermalne opreme u teškim radnim uvjetima.

Proračunski dio diplomskog rada uključuje tehno-ekonomski i termodinamički proračun stupnja djelovanja prve Hrvatske geotermalne elektrane Velika 1 koja se nalazi u Cigleni, uz detaljan opis njezine tehničke konfiguracije i performansi.

**Ključne riječi :** geotermalna energija, geotermalne elektrane, geotermalne tehnologije, LCOE, termodinamički stupanj djelovanja

## **ABSTRACT**

This thesis explores the current development of geothermal power plant technologies, with a particular emphasis on the importance of implementing renewable energy sources such as geothermal energy due to its inexhaustibility. The thesis is divided into three main parts: theoretical, research, and calculation.

The theoretical part describes geothermal energy and geothermal power plants, including different types of plants such as dry steam, flash steam, and binary cycle power plants. It analyzes the conditions necessary for the successful construction of geothermal power plants, investment risks, and environmental impacts. The current state of installed geothermal power plant capacities worldwide and in Croatia is also presented, along with a consideration of their advantages, disadvantages, and costs.

The research part focuses on the current state of geothermal power plant technologies. The technology readiness levels (TRL) of key components in geothermal power plants are presented, and the most important manufacturers of modern geothermal equipment are listed. The leading manufacturers of geothermal equipment and their specifications are examined, with a particular emphasis on the selection of materials for optimal operation of geothermal equipment in harsh working conditions.

The calculation part of the thesis includes a techno-economic and thermodynamic efficiency calculation for Croatia's first geothermal power plant, Velika 1, located in Ciglena, along with a detailed description of its technical configuration and performance.

**Keywords:** geothermal energy, geothermal power plants, geothermal technologies, LCOE, thermodynamic efficiency