

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Geoterminen energia energian tuotannossa

Geothermal energy in power generation

Työn tarkastaja: Kari Myöhänen

Työn ohjaaja: Kari Myöhänen

Lappeenranta 27.8.2019

Teemu Mustonen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Teemu Mustonen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Kari Myöhänen

Kandidaatintyö 2019

Sivuja 32, kuvia 16

Hakusanat: geoterminen, geoterminen energia, voimalaitos

Tässä kandidaatin työssä on tavoitteena käsitellä yleisesti geotermistä energiaa, siihen kuuluva voimalaitostekniikka ja poraustekniikka.

Geotermisen energian käsittelyssä tuodaan esille, mitä geoterminen energia on ja mistä se tulee. Lisäksi käsitellään geotermisen energian hyötyjä ja haittoja. Voimalaitostekniikan osassa käsitellään voimalaitostyypit, joita geotermisen energian tuotannossa käytetään. Poraustekniikan osiossa on yleiskatsaus poraamiseen ja sen haasteisiin.

Työssä huomataan, että geoterminen energia on erittäin ympäristöystävällinen uusiutuvan energian vaihtoehto, jota ei ole hyödynnetty aikaisemmin juuri ollenkaan öljyn tuotannon vuoksi. Lisäksi huomataan, että voimalaitostyypit ovat perusidealtaan hyvin samankaltaisia, mutta silti eniten käytetään flash steam -voimalaitostyyppiä.

Suurimpia haasteita geotermisen energian hyödyntämiselle on kehittää parempaa teknologiaa, minkä avulla voitaisiin porautua magmaan saakka. Tulevaisuuden kannalta on tärkeää selvittää, onko se taloudellisesti kannattavaa.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 JOHDANTO	5
2 GEOTERMINEN ENERGIA	6
2.1 Geotermisen energian hyödyt.....	8
2.1.1 Ympäristöystävällisyys	8
2.1.2 Uusiutuva energianmuoto	8
2.1.3 Tehokkuus, lämmitys ja jäähtyminen	9
2.1.4 Potentiaali, stabiilisuus ja laitteiston huolto.....	10
2.2 Geotermisen energian haitat.....	10
2.2.1 Ympäristöhaitat	10
2.2.2 Kustannukset	10
2.2.3 Kestävyys	11
3 GEOTERMINEN VOIMALAITOS	11
3.1 Dry steam -voimalaitos	13
3.1.1 Esittely ja historia.....	13
3.1.2 Toimintaperiaate	15
3.1.3 Ympäristönäkökulma	15
3.2 Flash steam -voimalaitos	17
3.2.1 Esittely	17
3.2.2 Toimintaperiaate	18
3.2.3 Flash steam -voimalaitoksen ympäristönäkökulma	21
3.3 Binary cycle -voimalaitos.....	22
3.3.1 Esittely	22
3.3.2 Toimintaperiaate	23
3.3.3 Ympäristönäkökulma	25
4 PORAUSTEKNIKAT	25
4.1 Poraamisen perusteet	25
4.1.1 Energian siirtäminen maanpinnalta kallioon.....	25
4.1.2 Kivien ja kalliolohkareiden poistaminen reiästä	26
4.1.3 Paineen hallinta poratussa reiässä	27
4.1.4 Poratun reiän halkaisijan ja suunnan säilyttäminen	28
4.1.5 Poratun reiän kontrollointi	28
5 Yhteenveto	30
Lähdeluettelo	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Yläindeksit

°C Celsius-aste

Lyhenteet

CO₂ Hiilidioksidi

MWh Megawattitunti

MW Megawatti

1 JOHDANTO

Tämän kirjallisuustyön aiheena on selvittää geotermisen energian hyödyt ja haitat, kuten ympäristöystävällisyys, energiamuoto, kustannukset ja kestävyys. Lisäksi työssä selvitetään geotermisten voimalaitoksien eri tyypit ja niiden toimintatavat. Työssä tutkitaan myös geotermisen voimalaitoksen rakentamisen alkuvaihetta, porausta.

Geotermisen energia on uusiutuva energiamuoto, joka tulee maan sisältä. Se on myös ympäristöystävällinen, ja sitä on saatavilla vuoden jokaisena päivänä, toisin kuin esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoima. Geotermisen energian suuret ongelmat ovat kustannuksissa ja kestävydessä.

Geotermisen energian voimalaitostyyppinä on kolme kappaletta, joista suurimman suosion on saanut flash steam -voimalaitos. Geotermiset voimalaitokset ovat hyvin samankaltaisia kuin hiili- ja ydinvoimalaitokset. Laitostyyppin valitseminen riippuu alueen geotermisen energian saatavuudesta ja kuumuudesta.

Syöttö- ja tuotantoreikiä poratessa ongelmiksi muodostuu kalliolohkareiden ja kivien poistaminen, paineen hallinta, reiän halkaisijan ja suunnan säilyttäminen, sekä poratun reiän kontrollointi.

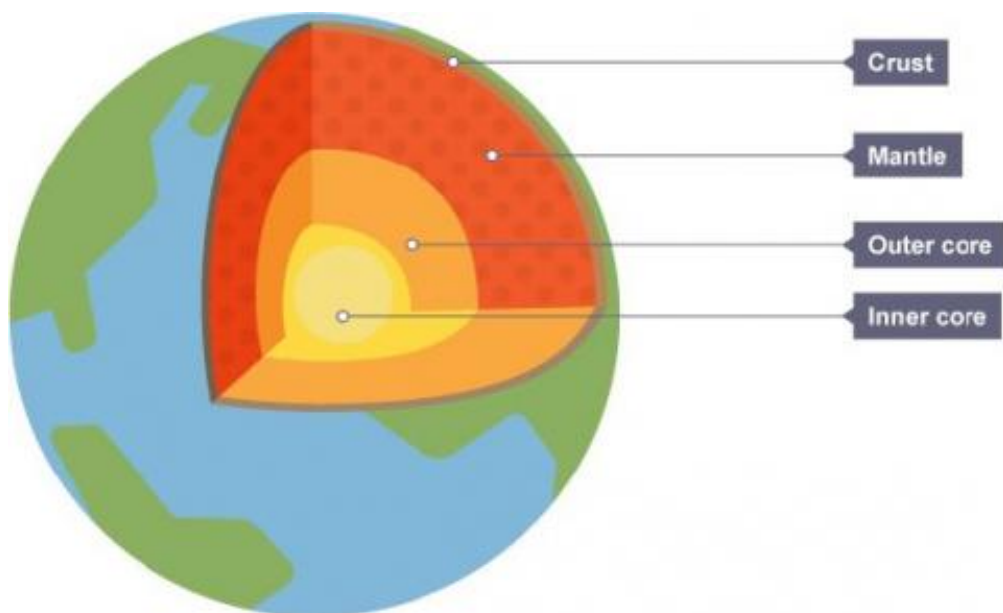
2 GEOTERMINEN ENERGIA

Geoterminen energia on lämpöä, joka tulee syvältä maan sisältä, jossa radioaktiivisten hiukkasten hidas hajoaminen maan ytimessä tuottaa geotermistä energiaa. Sana geoterminen tulee kreikkalaisista sanoista geo (maa) ja therme (lämpö). Geoterminen energia on uusiutuva energialähde, koska lämpöä tuotetaan jatkuvasti maan sisällä. Ihmiset käyttävät geotermistä lämpöä rakennusten lämmittämiseen ja sähkön tuottamiseen. (*Geothermal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, 2018)

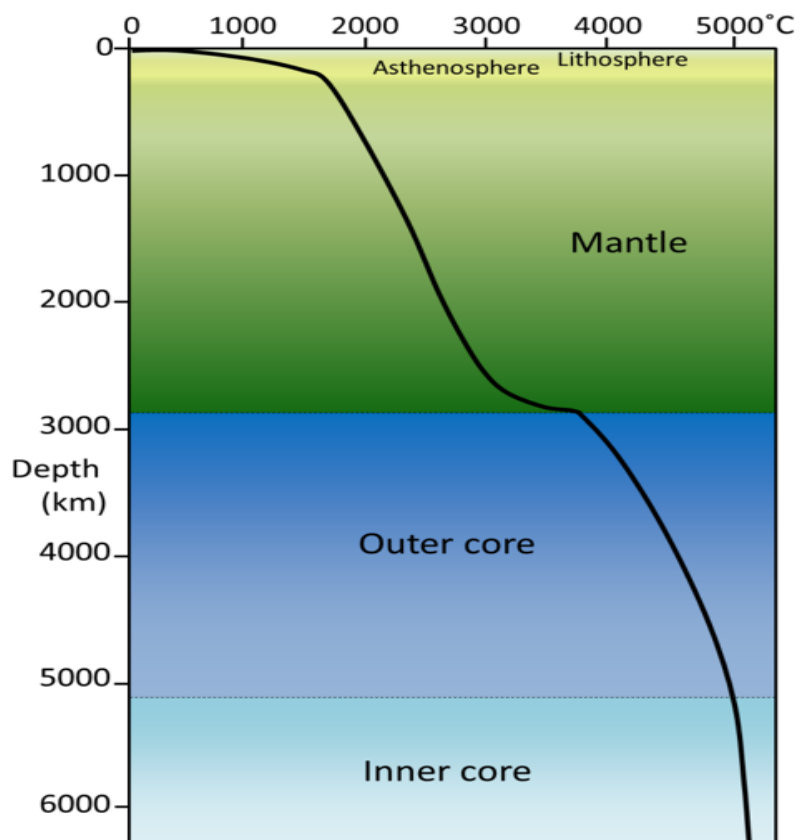
Maapallossa on neljä suurta kerrosta (kuva 1). Ensimmäistä kerrosta sanotaan sisäiseksi ytimeksi, joka on kiinteää rautaa ja sen halkaisija on noin 2400 kilometriä. Tutkijat ovat huomanneet, että maan sisäisen ytimen lämpötila on noin 6000 celsiusta, joka on yhtä kuuma kuin auringon pinta. Toinen kerros on ulkoinen ydin, jota kutsutaan myös magmaksi, on kuumaa sulaa kiveä, joka on noin 2400 kilometriä paksu. Kolmas kerros (ulompi ydin) eli vaippa, joka on noin 2900 kilometriä paksu, koostuu magmasta ja kalliosta. Vaipan lämpötilat vaihtelevat noin 200 celsiuksesta vaipan ylärajalla noin 4000 celsiukseen toisen kerroksen rajalle. Neljäs ja uloin kerros on luonnonkiveä, joka muodostaa mantereen ja merenpohjan, joka on noin 24–56 kilometriä paksu ja 5–8 kilometriä valtamerien alapuolella. (*Geothermal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, 2018)

Maan kuori hajoaa palasiin, joita kutsutaan mannerlaatoiksi. Magma on lähellä maan pintaa näiden levyjen reunojen lähellä, ja siellä on monia tulivuoria. Tulivuorista purkautuva laava on osittain magmaa. Kivet ja vesi imevät lämpöä magmasta syvälle maan alle. Syvemmällä pohjalla olevilla kivillä ja vedellä on korkeimmat lämpötilat. (*Geothermal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, 2018)

Maan lämpötila kasvaa 5-70 celsiusta kilometriä kohden uloimmalla kerroksella, mutta tyypillisestä noin 30 celsiusta per kilometri. Mitä syvemmälle mennään, sitä enemmän lämpötila kasvaa (kuva 2). (Randeberg, 2017)



Kuva 1. Maapallon kuoret (*Earth's Interior*, 2018)



Kuva 2. Maan lämpötila syvyyden mukaan (*The Temperature of Earth's Interior – Physical Geology*)

2.1 Geotermisen energian hyödyt

2.1.1 Ympäristöystävällisyys

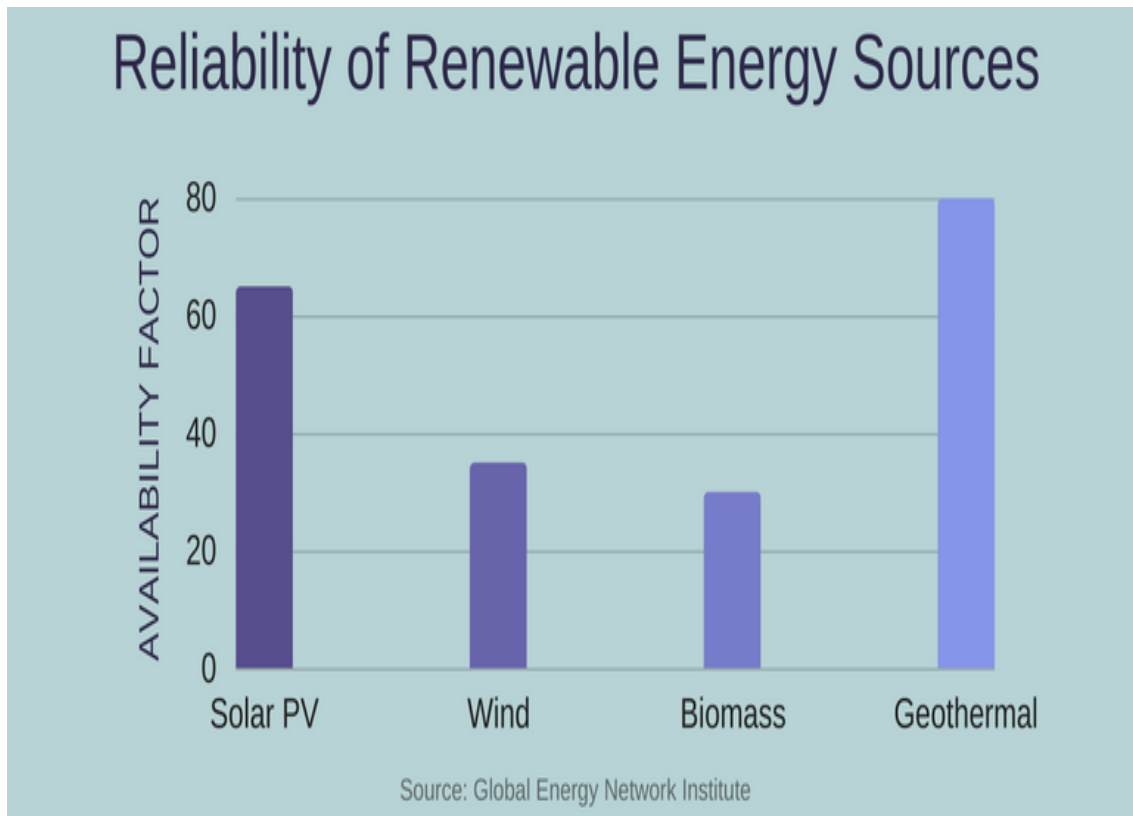
Geotermisen energia uutetaan maasta polttamatta fossiilisia polttoaineita, ja geotermiset alueet eivät tuota käytännössä minkäänlaisia päästöjä. Lisäksi geotermisen energia on erittäin hyödyllistä, sillä voi saavuttaa jopa 80%:n säästöt perinteiseen energiankäyttöön verrattuna. (*GreenMatch*, 2019)

Geotermisten resurssien kehittämistä pidetään hyödyllisenä ilmaston lämpenemisen torjumisessa, sillä geotermisen voimalaitoksen hiilijalanjälki on pieni. Keskimääräisestä geotermisestä voimalaitoksesta vapautuu noin 122 kilogrammaa CO₂:ta jokaisesta tuotetusta megawattitunnista (MWh), joka on noin kahdeksasosa normaalin hiilivoimalaitoksen hiilidioksidipäästöistä. (*Energy Informative*)

2.1.2 Uusiutuva energianmuoto

Geotermisellä energialla on suuri etu muihin uusiutuviin energioihin verrattuna, kuten tuulivoimaan, aurinkoenergiaan ja biomassaan. Geotermisen energia on poikkeuksetta vakio energianlähde, joka tarkoittaa sitä, ettei se ole riippuvainen tuulesta tai auringosta, vaan se on käytettävissä ympäri vuoden. Kun tarkastellaan saatavuuskerrointa, joka osoittaa energialähteen luotettavuuden ja sen, kuinka vakio lähde on, (kuva 3) huomataan, että geotermisen energia on listan kärjessä. Tämä tukee väitettä geotermisen energian riippumattomuudesta ulkoisiin olosuhteisiin toimittaessa energiaa. (*GreenMatch*, 2019)

Geotermisen energia voidaan leimata myös ympäristöä säästäväksi, joka on uusiutuvan energianlähteen merkki. Toisin sanoen geotermisen energia on resurssi, joka voi ylläpitää omaa kulutustaan, toisin kuin esimerkiksi fossiiliset polttoaineet. Tutkijoiden mukaan geotermisen energia kestää kirjaimellisesti miljardeja vuosia. (*Energy Informative*)



Kuva 3. Uusiutuvien energianlähteiden saatavuus (*Energy Informative*)

2.1.3 Tehokkuus, lämmitys ja jäähtyminen

Geotermiset lämpöpumpputermostukset käyttävät 25%-50% vähemmän sähköä kuin perinteiset lämmitys- tai jäähdytysjärjestelmät, ja joustavalla suunnittelulla ne voidaan säätää tilanteisiin, jossa ne vaativat vähemmän tilaa laitteistolle kuin perinteiset järjestelmät. (*GreenMatch*, 2019)

Tarvitaan noin 150 °C tai korkeampia lämpötiloja, jotta turbiinit pyörivät tehokkaasti ja tuottavat sähköä geotermisen energian avulla. Toinen lähestymistapa on käyttää (suhteellisen pieni) lämpötilaeroa pinnan ja maan lähteen välillä. Maa on yleensä kestävämpi vuodenaikojen lämpötilavaihteluissa kuin ilma, joten vain muutama metri pinnan alapuolella oleva maa voi toimia jäähdytysalueena tai lähteenä geotermisen lämpöpumpun kanssa samalla tavalla kuin sähköinen lämpöpumppu toimii. (*Energy Informative*)

2.1.4 Potentiaali, stabiilisuus ja laitteiston huolto

Geotermisissä voimalaitoksissa ympäri maailmaa saadaan tällä hetkellä noin 10 715 MW (2010) sähköä – paljon vähemmän kuin asennettu geotermisen lämmityskapasiteetti (noin 28 000 MW). Geotermisen energia on luotettava energianlähde. Voimalaitoksen teho voidaan ennustaa huomattavalla tarkkuudella, toisin kuin esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimassa, jossa sää vaikuttaa suuresti sähköntuotantoon. Lisäksi geotermisissä voimalaitoksissa on korkea kapasiteettikerroin – todellinen tehontuotto on hyvin lähellä asennettua kokonaiskapasiteettiä. (*Energy Informative*)

Koska geotermisissä järjestelmissä on vähän liikkuvia osia, jotka ovat suojaassa rakennusten sisällä, geotermisten lämpöpumppujärjestelmien käyttöikä on suhteellisen korkea. Lämpöpumppuputkilla on jopa 25-50 vuoden takuu, kun normaalisti pumppu kestää noin 20 vuotta. (*GreenMatch*, 2019)

2.2 Geotermisen energian haitat

2.2.1 Ympäristöhaitat

Riippumatta geotermisen energian ympäristöystävällisestä maineesta, se aiheuttaa pieniä ympäristöä koskevia huolenaiheita. Geotermisen energian uuttaminen maaperästä johtaa kasvihuonekaasujen, kuten rikkivedyn, hiilidioksidin, metaanin ja ammoniakkin vapautumiseen. Päästetyn kaasun määrä on kuitenkin pienempi kuin fossiilisten polttoaineiden tapauksessa. (*GreenMatch*, 2019)

2.2.2 Kustannukset

Kaupalliset geotermiset energiaprojektit ovat kalliita. Uusien säiliöiden tutkiminen ja poraaminen maksavat paljon, tyypillisesti puolet kustannuksista. Kokonaiskustannukset ovat yleensä noin 2-7 miljoonaa dollaria (1,8-6,3 miljoonaa euroa) voimalaitokselle, jonka kapasiteetti on 1 MW. Lisäksi useimpia geotermisiä resursseja ei voida käyttää kustannustehokkaasti nykyisen tekniikan ja energian hintojen vuoksi. (*Energy Informative*)

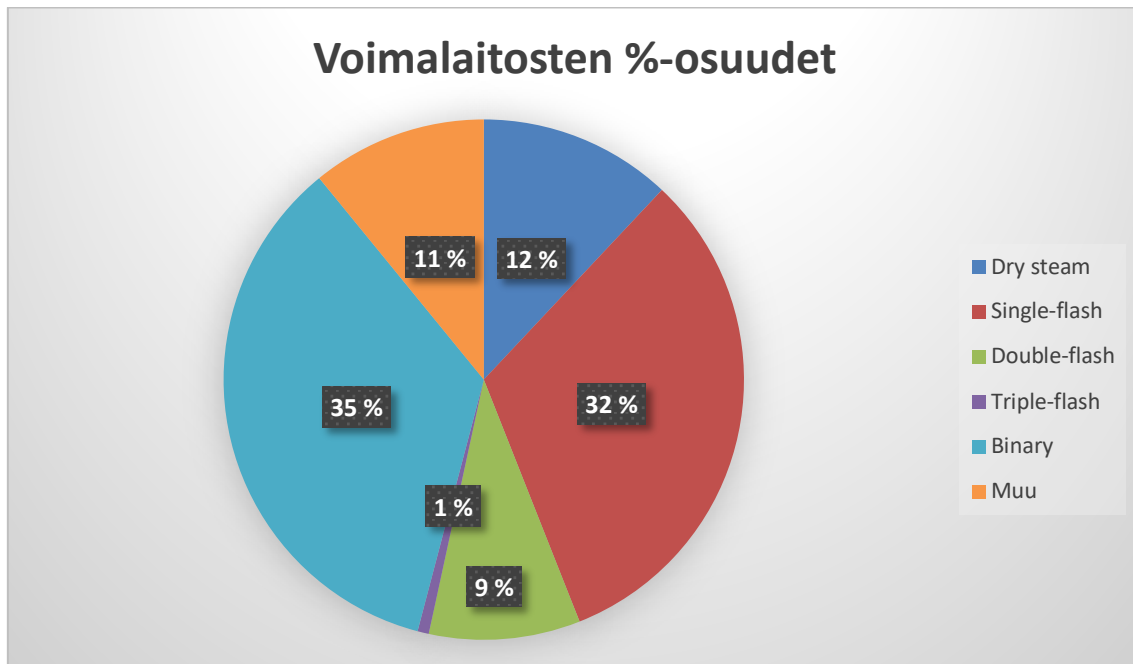
2.2.3 Kestävyys

Sadevesi on kulkenut maanpinnan läpi geotermisiin varastoihin tuhansien vuosien ajan. Varastot voivat tyhjentyä, mikäli neste poistetaan nopeammin, kuin sitä korvataan. Nestettä voidaan laittaa takaisin geotermisiin varastoihin, kun lämpöenergia on hyödynnetty (turbiini on tuottanut sähköä). On vaikeaa selvittää, kuinka suuri vaikutus geotermisellä energialla on tulevaisuuden energiajärjestelmiin, joka riippuu tekniikan kehityksestä ja energian hinnasta. Ei ole varmaa tietoa, miltä tilanne näyttää 10 tai 20 vuoden päästä. (*Energy Informative*)

Ainoa ehtymätön vaihtoehto geotermisen energian hankintaan on porautua suoraan magmaan, mutta tekniikka sitä varten on vielä kehitysprosessissa. Tämä vaihtoehto on sijoituksen arvoinen siitä syystä, että magma on olemassa miljardeja vuosia. (*GreenMatch*, 2019)

3 GEOTERMINEN VOIMALAITOS

Geotermisiä voimalaitoksia (kuva 5) käytetään sähkön tuottamiseen geotermisen energian (maapallon sisäinen lämpöenergia) avulla. Ne toimivat pohjimmiltaan samalla tavalla kuin hiili- tai ydinvoimalaitos. Geotermisen lämmön avulla maan lämpö korvaa hiilivoimalan tai ydinvoimalaitoksen reaktorin kattilan. Kuuma vesi tai höyry uutetaan maasta voimalaitokseen. Useimmissa geotermisissä voimalaitoksissa maasta tullut vesi syötetään takaisin maanpintaan. Geotermisiä voimalaitoksia on 3 päätyyppiä, dry steam -, flash steam- ja binary cycle -voimalaitos, joista yleisin on flash steam -voimalaitos. Kuvassa 4 on esitelty näiden voimalaitoksien päätyyppien kappalemäärät prosenttiosuuksina. Laitoksen valinta riippuu siitä, kuinka paljon geotermistä energiaa on saatavana ja kuinka kuuma resurssi on. Mitä kuumempi resurssi, sitä vähemmän nestettä täytyy virrata maasta sen käyttämiseksi, ja sitä suurempi resurssin hyödyllisyys on. (Cey *et al.*, 2017)



Kuva 4. Voimalaitostyyppien %-osuudet



Kuva 5. Geoterminen voimalaitos Islannissa (Cey *et al.*, 2017)

3.1 Dry steam -voimalaitos

3.1.1 Esittely ja historia

Kuivahöyryvoimalaitokset olivat geotermisten voimalaitoksien ensimmäinen tyyppi, jolla saavutettiin kaupallinen asema. Kyseisen voimalaitoksen historia juontaa juurensa yli 110 vuotta taaksepäin vuoteen 1904, jolloin prinssi Piero Ginori Conti rakensi ja käytti pieniä höyrykoneita (kuva 6) luonnollisilla höyrystyksillä, jotka tulivat maasta Toscanan alueella Italiassa. Koska geofluidi koostui vain höyrystä, oli helppo kytkeä mekaaninen laite käytettävissä olevan energian hyödyntämiseksi. Vaikka prinssin moottori tuotti tarpeeksi sähköenergiaa valaisemaan vain viisi hehkulamppua, oli se ponnahduslauta suuremmille voimalaitoksille. (DiRippo and Ronald, 2016a)

Kuivahöyryvoimalaitokset ovat yleensä yksinkertaisempia ja halvempia kuin sen ”serkukset” eli flash steam -voimalaitokset. Vaikka maailmassa on vain kaksi suurta kuivahöyrykenttää; Larderello, Italia ja The Geysers, Yhdysvallat (kuva 7), on joulukuusta 2014 ollut toiminnassa 68 voimalaitosta, joka on noin 12% (kuva 4) kaikista geotermisistä voimalaitoksista. Kuivahöyryvoimalaitosten osuus on asennettuna 2865 MW eli noin 24% kaikesta geotermisestä kapasiteetistä maailmassa. Joillakin Indonesian pelloilla on kuivahöyryominaisuuksia, mutta ne voivat johtua höyrypatoumien muodostumisesta. (DiRippo and Ronald, 2016a)



Kuva 6. Kuivahöyryvoimalaitos vuonna 1904 Italiassa, Lardellosa (*Alchetron*)



Kuva 7. Kuivahöyryvoimalaitos Yhdysvalloissa, The Geysers (*NCPA*, 2015)

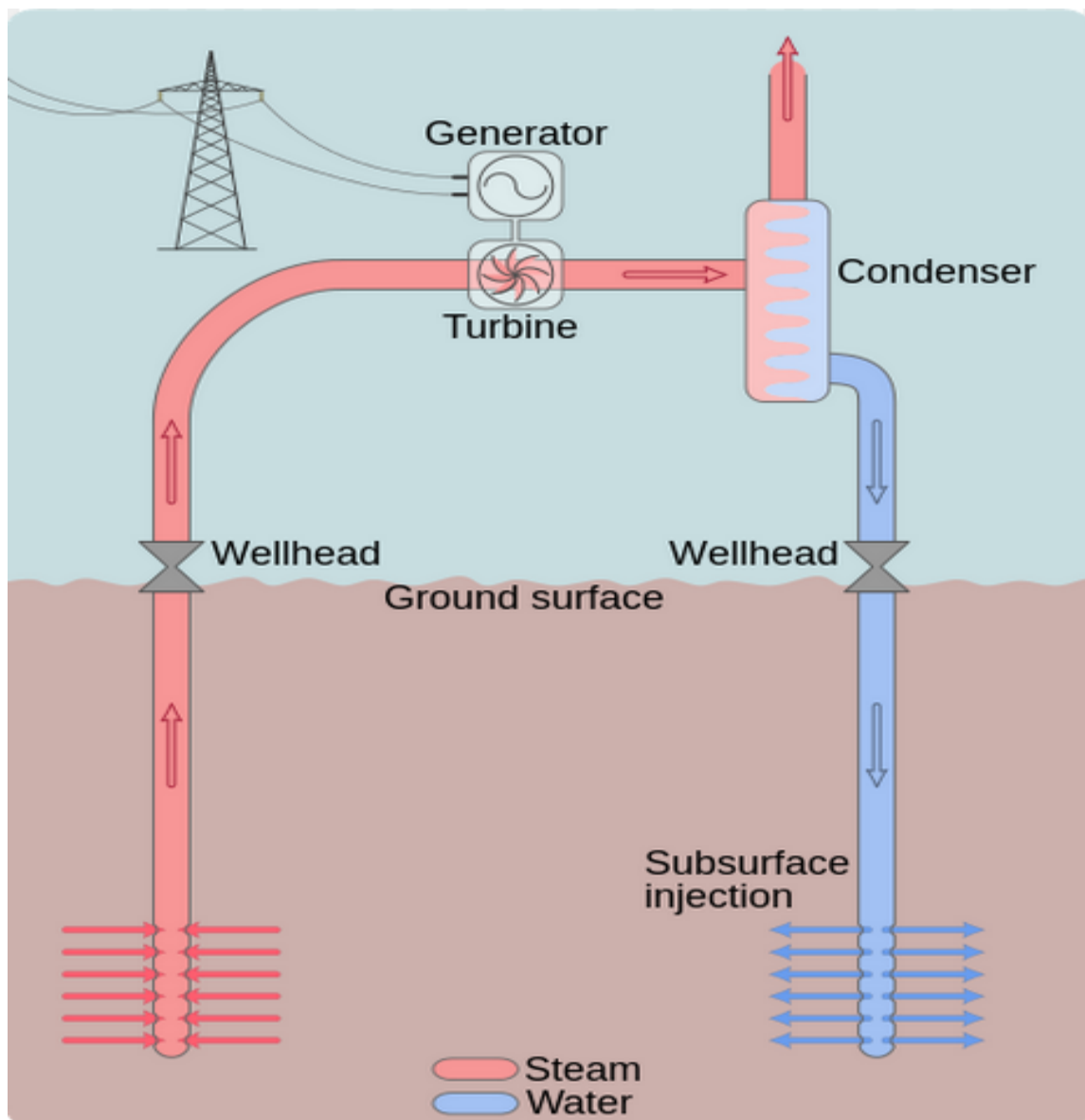
3.1.2 Toimintaperiaate

Kuivahöyryn geotermiset varastot ovat erittäin harvinaisia. Höyry, jonka lämpötila on 180-350 °C, voidaan uuttaa porausreiän kautta ja syöttää suoraan höyryturbiiniin. Normaalisti höyry syötetään yhteen turbiiniin taloudellisesti suuren turbiinin käytön mahdollistamiseksi. Putket, jotka kuljettavat höyryä kaivojen päistä turbiiniin, sisältävät erilaisia suodattimia, jotka poistavat kivihiukkasia ja lauhtunutta höyryä matkalla. (Breeze, 2014a)

Geotermisen laitoksen (kuva 8) höyryturbiini on yleensä tavanomainen reaktioturbiini. Koko nykyaikaisissa laitoksissa on tyypillisestä välillä 20-120 MW. Suhteellisen alhaisen höyryn lämpötilan ja turbiinien pienen koon seurauksena hyötysuhde on yleensä alhainen, noin 30%. Joissakin tapauksissa turbiinista poistuva höyry voi päästä suoraan ilmakehään. Höyry sisältää kuitenkin noin 2-10% muita kaasuja, kuten hiilidioksidia ja rikkivetyä. Näissä olosuhteissa höyryturbiinin pakokaasujen on oltava lauhdutettu veden poistamiseksi ja käsiteltävä siten epäpuhtauksien, kuten rikkivedyn poistamiseksi ennen niiden päästämistä ilmakehään. (Breeze, 2014a)

3.1.3 Ympäristönäkökulma

Kuivahöyryvoimalaitoksilla on erittäin vähän potentiaalisia vaikutuksia ympäristöön. Geofluidi koostuu vain höyrystä, ei nesteestä, joten mineraalikuormitteista suolaliuosta ei ole käytettävä. Höyryssä olevat tiivistymättömät kaasut eristetään jäähdyttimessä ja poistetaan tyhjiöpumppujen tai höyrysuihkuputkien avulla, ja niitä voidaan käsitellä rikkivedyn poistamiseksi. Joistakin päästöjärjestelmistä peräisin oleva rikki on puhtaassa muodossa ja voidaan myydä kaupallisesti tai hävittää asianmukaisella kaatopaikalla. (DiRippo and Ronald, 2016b)



Kuva 8. Dry steam -voimalaitos, toimintaperiaate (Cey *et al.*, 2017)

3.2 Flash steam -voimalaitos

3.2.1 Esittely

Flash steam -voimalaitos (kuva 9) on geotermisen energiateollisuuden perusta. Se on usein ensimmäinen voimalaitos, joka asennetaan kehitettyyn nestepitoiseen geotermiseen kenttään. Joulukuusta 2014 lähtien on toiminnassa ollut 185 voimalaitosta 17 maassa ympäri maailman. Flash steam -voimalaitokset kattavat 32% (kuva 4) kaikista geotermisistä voimalaitoksista. Ne kattavat noin 43% kaikesta asennetusta geotermisestä tehokapasiteetista maailmassa, ja keskimääräinen yksikköteho on hieman alle 28 MW voimalaitosta kohti. (DiRippo and Ronald, 2016c)

Double-flash steam -voimalaitos on parannus flash steam -voimalaitokseen, joka voi tuottaa 15-20% enemmän tehoa samoissa geotermisissä olosuhteissa. Laitos on monimutkaisempi, kalliimpi ja vaatii enemmän huoltoa, mutta ylimääräinen energiateho on hyvä peruste tällaisen voimalaitoksen asentamiseksi. Double-flash steam -voimalaitoksia on melko paljon ja niitä on toiminnassa 10 eri maassa. Joulukuusta 2014 lähtien on toiminnassa ollut 54 voimalaitosta, joka on noin 9.4% (kuva 4) kaikista geotermisistä voimalaitoksista, ja keskimäärin yksikköteho on 35MW voimalaitosta kohti. (DiRippo and Ronald, 2016d)

Triple-flash steam -voimalaitokset lisäävät uuden paisuntavaiheen, mikä lisää entisestään eksergian käytön tehokkuutta, mutta se tekee voimalaitoksesta monimutkaisemman ja kalliimman. Yksi haasteista on kvartsin saostumisen välttäminen voimalaitoksen laitteissa tai putkisto- ja kaivojärjestelmässä. Joulukuusta 2014 lähtien on toiminnassa ollut vain neljä tällaista voimalaitosta, joka on noin 0.7% (kuva 4) kaikista geotermisistä voimalaitoksista. Keskimääräinen yksikköteho on 75MW voimalaitosta kohti, mikä on kaiken tyyppisten geotermisten voimalaitoksien suurin koko. (DiRippo and Ronald, 2016d)



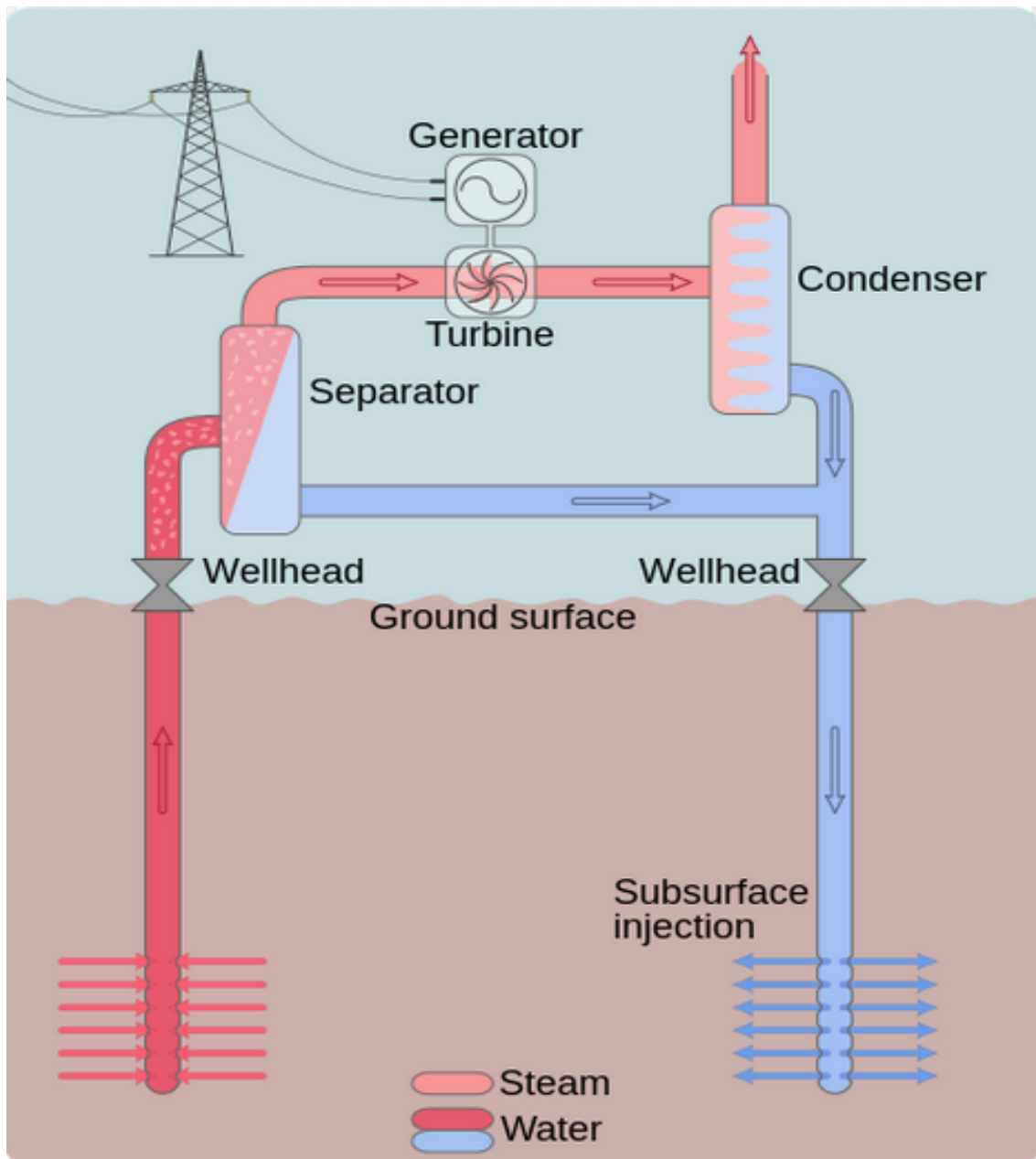
Kuva 9. Flash steam -voimalaitos Nesjavellirissä, Islannissa (Vimeo, 2010)

3.2.2 Toimintaperiaate

Useimmat korkean lämpötilan geotermiset varastot tuottavat nestettä, joka on sekoitus höyrystä ja nestemäisestä suolavedestä erittäin korkeassa paineessa (tyypillisesti 10 bar). Höyrypitoisuus painon mukaan on tyypillisesti 10-50%. Yksinkertaisin menetelmä tällaisen resurssin hyödyntämiseksi on erottaa höyry ja nesteestä ja käyttää höyryä yksin höyryturbiinin ohjaamiseen. (Breeze, 2014b)

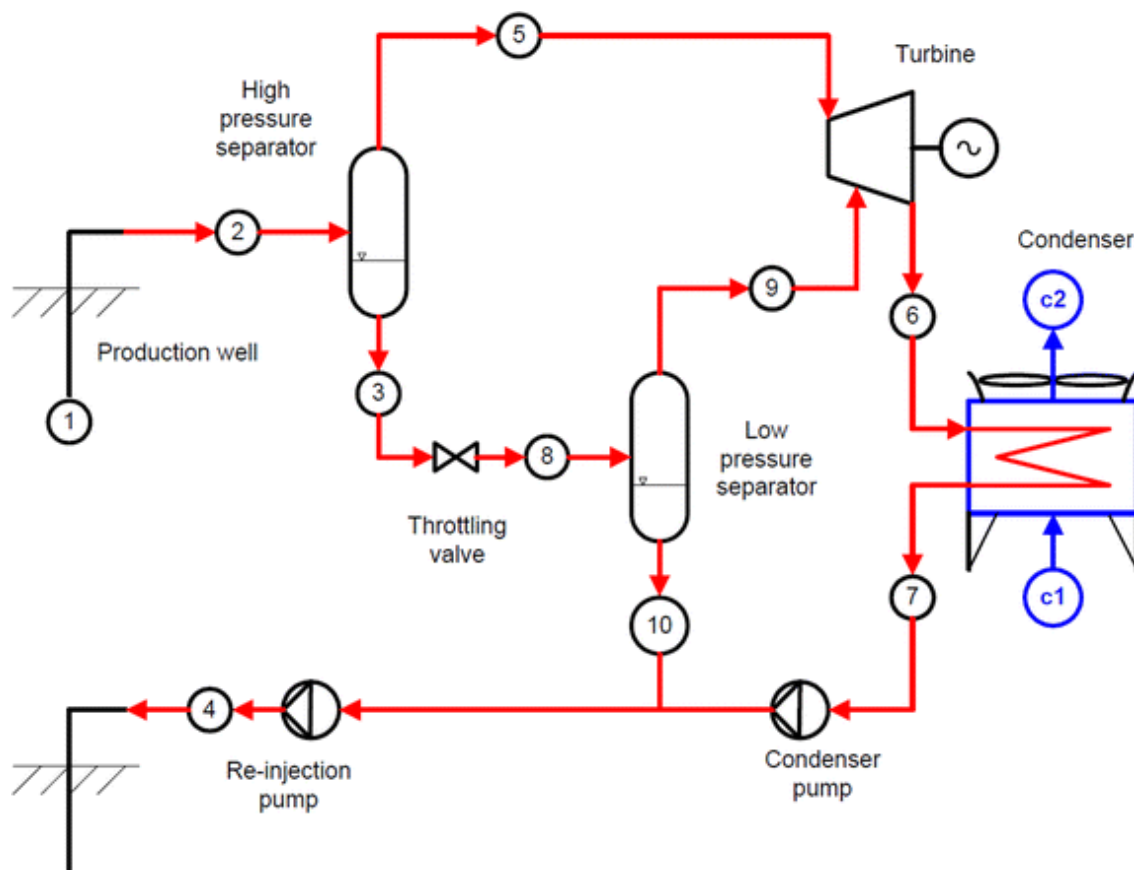
Tuottavampi vaihtoehto on viedä yhdistetty neste venttiilin läpi paisunta-astiaan, jota pidetään alhaisemmassa paineessa kuin geotermisen neste varastosta. Paineen äkillinen aleneminen kiehuttaa kuumaa nestettä höyryksi, jolloin muodostuu suurempi määrä höyryä, kuin oli käytettävissä aiemmin. Kaikki tämä paisuntahöyry voidaan siten erottaa nesteestä ja käyttää höyryturbiinin pyörittämiseen. Höyryturbiinista poistuva höyry on käsiteltävä täsmälleen samalla tavalla kuin geotermisen höyryvoimalaitoksessa ilmakehän saastumisen estämiseksi. Jäljellä oleva neste, joka sisältää runsaasti liuenneita suoloja ja joka voi aiheuttaa saastumisongelman, on yleensä injektoitava takaisin

geotermisen varaston sisään. Flash-tekniikan voimalaitokset (kuva 10) palauttavat yleensä paljon korkeamman prosenttimäärän geotermisestä fluidista – jopa 85%. (Breeze, 2014b)

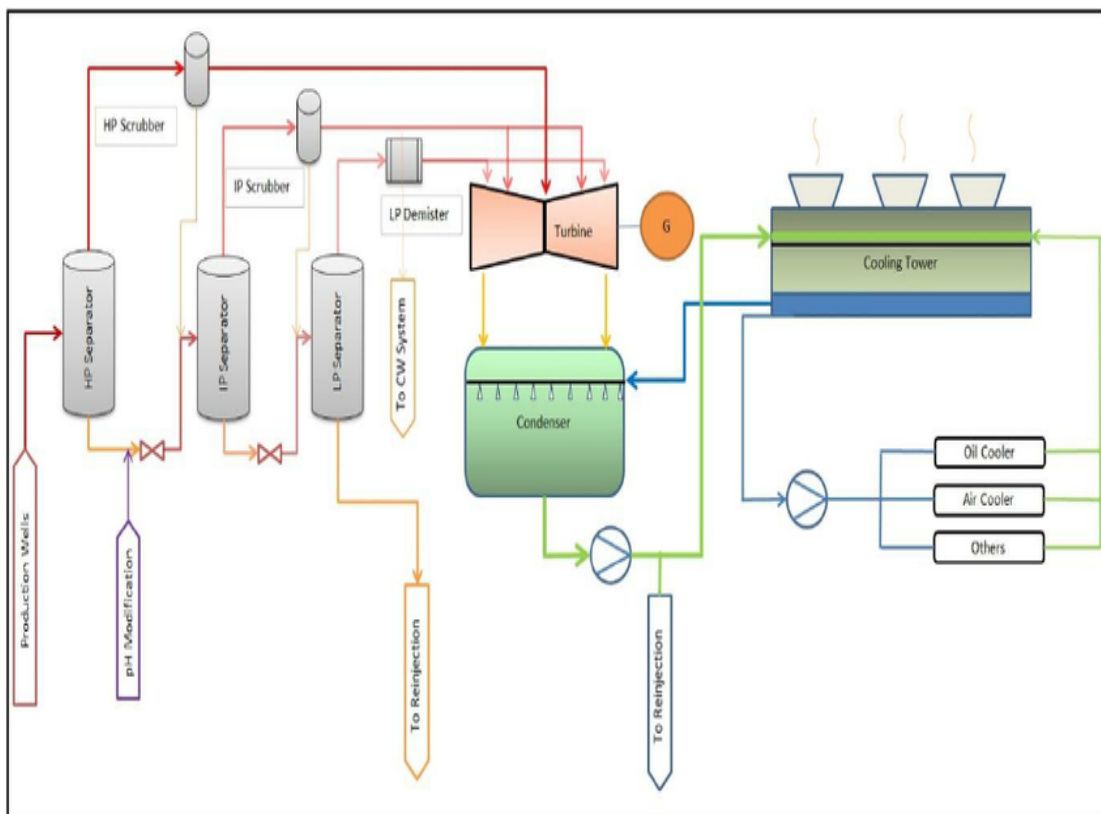


Kuva 10. Single-flash steam plant, toimintaperiaate (Cey *et al.*, 2017)

Double- ja triple-flash steam -voimalaitokset eroavat single-flash steam -voimalaitoksista (kuvat 11 ja 12) siten, että double-flash steam -voimalaitoksessa on kaksi höyrynerotinta ja triple-flash steam -voimalaitoksessa kolme, kun single-flash steam -voimalaitoksessa on vain yksi. Double-flash steam -voimalaitoksessa on korkean paineen höyrynerotin, joka on ensimmäinen höyrynerotin, johon geofluidi osuu. Höyrynerottimesta lähtee osa geofluidia suoraan turbiiniin ja loput höyrystä menee matalapaineen höyrynerottimelle, josta osa geofluidista jatkaa turbiinille ja loput takaisin injektioireikään. Triple-flash steam -voimalaitoksessa on täysin sama idea, kuin double-flash steam -voimalaitoksessa, mutta kyseisessä voimalaitoksessa on korkeapaineisen ja matalapaineisen höyrynerottimen välissä kolmas höyrynerotin, välipaineen höyrynerotin.



Kuva 11. Double-flash steam plant, toimintaperiaate (El Haj Assad, Bani-Hani and Khalil, 2017)



Kuva 12. Triple-flash steam plant, toimintaperiaate (Richardson and Addison, 2014)

3.2.3 Flash steam -voimalaitoksen ympäristönäkökulma

Geoterminen höyry sisältää ei-tiivistyviä kaasuja, kuten rikkivetyä, hiilidioksidia, metaania ja muita kaasuja hyvin pieniä määriä. Höyryn hallitsematon poistaminen vapauttaa kaikki nämä kaasut ilmakehään. Normaleissa olosuhteissa nämä kaasut eristetään lauhduttimessa, viedään ejektoreihin ja käsitellään tarvittaessa ennen ilmakehään päästämistä. Flash-voimalaitoksista vapautuvaa hiilidioksidia ei vähennetä, sillä se on pieni kasvihuonekaasujen lähde. Tärkein tapa estää veden saastuminen on ruiskuttaa jätesuolaliuos takaisin varastoon. Tämä on hyväksytty tapaa hävittää geoterminen jäteneite voimalaitoksissa ympäri maailman. Veden uudelleen injektioimisen lisäetuna on se, että siinä palautetaan osa vedestä takaisin geotermiseen varastoon, mitä käytettiin tuotannon aikana. (DiRippo and Ronald, 2016e)

Double- ja triple-flash steam -voimalaitoksilla on samat potentiaaliset ympäristövaikutukset kuin flash steam -voimalaitoksilla. Veden saastumisen suhteen kyseisillä voimalaitostyypeillä on yleensä enemmän saasteita vedessä, kuin flash steam -voimalaitoksella. Tämän vuoksi veden uudelleeninjektoiminen on näillä voimalaitoksilla kiireellisempi. (DiRippo and Ronald, 2016f)

3.3 Binary cycle -voimalaitos

3.3.1 Esittely

Binäärisyklinen geoterminen voimalaitos (kuva 13) on termodynaamisessa periaatteessa lähinnä tavanomaisiin fossiilisiin tai ydinvoimaan liittyvä voimalaitos siten, että käyttöneste käy läpi todellisen suljetun syklin. Vaikka yleisesti uskotaan, että ensimmäinen geoterminen binääri -voimalaitos otettiin käyttöön Venäjällä 1967, on todisteita siitä, että aikaisempi binäärinen voimalaitos oli olemassa Italiassa vuonna 1940. Laitos oli suunniteltu vuonna 1939, asennettu 1940 ja toimi vuoteen 1943 asti. Vuonna 1967 Venäjällä toimineen voimalaitoksen teho oli 670 kW. Kyseistä voimalaitosta käytettiin lämpö- ja sähköenergian lähteenä pienessä kylässä. Siellä se toimi menestyksekkäästi monien vuosien ajan, todistaen binäärivoimalaitoksien käsitteen sellaisena kuin se tunnetaan nykyään. (DiRippo and Ronald, 2016g)

Nykyään binääriset voimalaitokset ovat eniten levinnyt voimalaitostyyppi ympäri maailman. Joulukuusta 2014 on ollut toiminnassa 203 binäärisyklistä voimalaitosta 15 eri maassa tuottaen yhteensä 1245 MW tehoa. Ne muodostavat yli 35% (kuva 4) kaikista toiminnassa olevista geotermisistä voimalaitoksista, mutta tuottavat vain 10.4% kokonaistehosta. Voimalaitoksen keskimääräinen tehoarvo on vain 6 MW, mutta 15-22 MW tehoiset voimalaitokset ovat tulossa käyttöön uudella teknologialla. Useita binäärisiä voimalaitoksia on viime aikoina lisätty olemassa oleviin flash steam -voimalaitoksiin palauttaakseen enemmän energiaa kuumasta jätesuolaliuoksesta. (DiRippo and Ronald, 2016g)



Kuva 13. Binary cycle -voimalaitos Nevadassa, Yhdysvalloissa (*OpenEI*)

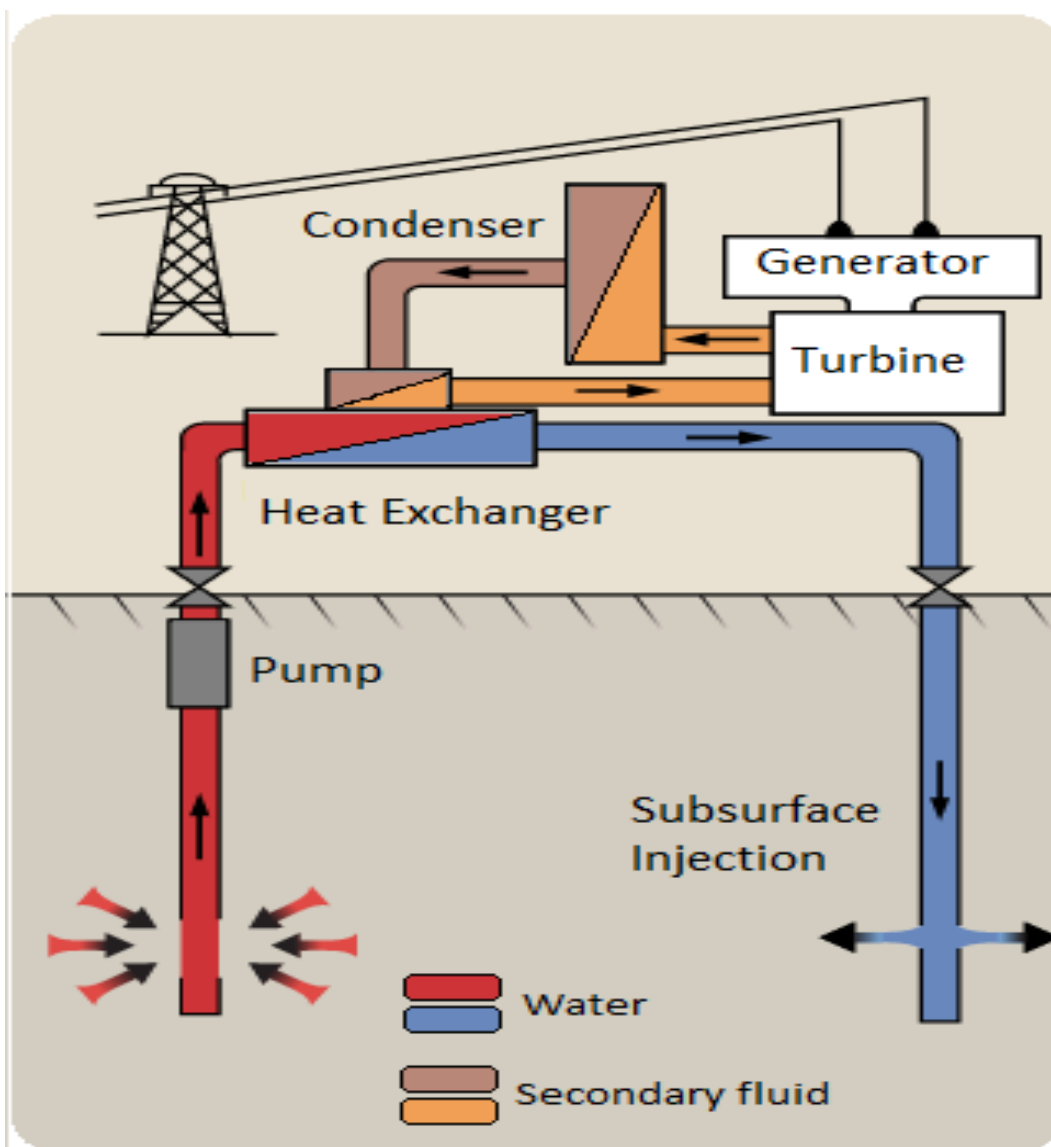
3.3.2 Toimintaperiaate

Geotermiset kuivahöyry ja flash steam -voimalaitokset käyttävät geotermistä fluidia 180-350 °C lämpötilassa. Mikäli fluidi on lämpötilaltaan alhaisempaa, tavanomainen höyrytekniikka osoittautuu usein liian tehottomaksi ollakseen taloudellisesti kannattavaa. Energiaa voidaan kuitenkin edelleen ottaa fluidista energian tuottamiseksi binäärisyklisen voimalaitoksen avulla. Tämän tyyppisissä laitoksissa on kaksi nestesykliä: ensimmäinen sisältää matalan lämpötilan fluidin geotermisestä lähteestä ja toinen on turbiinisykli, johon sisältyy alhaisen kiehumispisteen fluidi. (Breeze, 2014c)

Binäärisessä voimalaitoksessa (kuva 14) geoterminen fluidi uutetaan geotermisestä varastosta ja johdetaan välittömästi lämmönvaihtimen läpi, missä sen sisältämää lämpöä käytetään sekundaarisen nesteen haihduttamiseen. Tämä sekundaarinen neste on sisälletty toiseen, täysin suljettuun syklijärjestelmään. Neste voi olla orgaaninen neste, joka höyrystyy suhteellisen alhaisessa lämpötilassa. (Breeze, 2014c)

Tyypillisen binäärisen voimalaitoksen teho on paljon pienempi kuin muut geotermiset voimalaitostyyppit. Pienet modulaariset voimalaitokset kuitenkin soveltuvat usein

standardisointiin vähentäen tuotantokustannuksia. Useita voimalaitoksia voidaan sijoittaa rinnakkain, jotta saadaan laitos, jolla on suurempi teho. Vaikka normaali applikaatio binääriteknologiaan on käyttää matalalämpötilaista geotermistä resurssia, tekniikkaa voidaan käyttää myös tuottamaan enemmän energiaa flash steam -voimalaitoksessa. Tässä tapauksessa höyrystyksen jälkeen jäljelle jäänyt geoterminen fluidi johdetaan lämmönvaihtimen läpi ennen uudelleeninjektointia, jolloin ylimääräistä energiaa voidaan ottaa pienen binääriyksikön virran kytkemiseksi. Binäärisen yksikön lisääminen tavalliseen flash steam -voimalaitokseen lisää kustannuksia, mutta tuloksena olevan hybridilaitoksen teho on suurempi. (Breeze, 2014c)



Kuva 14. Binäärisykli voimalaitoksen toimintaperiaate (Cey *et al.*, 2017)

3.3.3 Ympäristönäkökulma

Geotermiset binäärivoimalaitokset ovat ympäristövaikutusten kannalta kaikkein hyvälaatuisimpia kaikista voimalaitoksista. Binääristen voimalaitoksien ainoa vaikutus ympäristöön tapahtuu laitoksen lämmön hylkimispuolella. Geofluidi pumpataan geotermisestä varastosta ja se palaa kokonaan varastoon, kun se on kulkenut lämmönvaihtimien läpi. Näin mahdollisesti haitallinen geofluidi ei koskaan näe päivänvaloa. Lisäksi kiertovesi on eristetty kokonaan putkiin, lämmönvaihtimiin ja turbiiniin, joten se ei myöskään joudu kemialliseen tai fysikaaliseen kosketukseen ympäristön kanssa. (DiRippo and Ronald, 2016h)

Ainoaksi mahdolliseksi binäärisen voimalaitoksen aiheuttamaksi saastuttamiseksi voidaan kutsua lämpösaasteeksi, joka on toisin sanoen lämmön määrä, joka täytyy hylätä syklistä termodynamiikan lakien nojalla. Binäärisen voimalaitoksen tapauksessa lämpötehon määrä, joka ympäristön on absorboitava, on noin yhdeksän kertaa laitoksen tuottaman energian määrä. Tämä vaikutus voidaan kuitenkin minimoida, jos hukkalämpöä voidaan käyttää maaperän tai kasvihuoneen lämmitykseen. Esimerkiksi Venäjällä vuonna 1967 olleen binäärisen voimalaitoksen hukkalämpö käytettiin maanviljelijöiden avuksi pidentämään kasvukautta. (DiRippo and Ronald, 2016h)

4 PORAUSTEKNIIKAT

4.1 Poraamisen perusteet

4.1.1 Energian siirtäminen maanpinnalta kallioon

Reiän tekemiseksi energiaa on siirrettävä maan pinnalta kallion pintaan kaivoporausken lopussa. Porausken virtalähde on kehittynyt höyrykäyttöisten mekaanisesti kytkettyjen laitteiston ajoista standardiin dieselsähköiseen voimansiirtoon. Tässä kokoonpanossa kahdesta neljään dieselmoottoria (tehokkuudeltaan enimmillään 1500 kW) pyörittävät sähkögeneraattoreita, jotka toimittavat virtaa porauslaitteistolle. (Bronicki, 2018a)

Porakierros käsittää porausputken ja pohjareikäkokoonpanon, joka sisältää porapannat, stabilisaattorit, terän (kuva 15) ja muut porausputken alapuolella olevat erikoistyökalut.

Porakierroksen yläpää on kiinnitetty kääntyvään painekiinnikkeeseen, joka antaa porausnesteen virrata lietepumpuista ylöspäin putken yläpuolelle kääntölaitteeseen ja lopulta alaspäin pitkin porausputkea sen pyöriessä. (Bronicki, 2018a)

Porakierroksen siirtämistä reikään ja ulos kutsutaan laukaisuksi. Laukaisuja tarvitaan yleensä silloin, kun poranterä tai jokin muu osa reiän alapäästä täytyy vaihtaa. Mitä pidemmälle reikää on saatu porattua, sitä kauemmin porakierroksen nostaminen tai laskeminen kestää. (Bronicki, 2018a)

4.1.2 Kivien ja kalliolohkareiden poistaminen reiästä

Porakoneen pohjaan kiinnitetty terä pyörii murtaakseen (ja vähentämään) kallion kiveä pienemmiksi kappaleiksi tehdäkseen porattavaa reikää syvemmäksi. Tähän tarkoitukseen on olemassa valtava määrä erilaisia poranteriä, joita käytetään erilaisissa kallioperissä. Kun kallio on murrettu pienemmiksi palasiksi, se on poistettava reiän pohjasta paljastaakseen tuoretta kallion pintaa, jotta energiaa ei tuhlaata murskaamalla uudestaan samoja palasia. Puhdistus tehdään nestevirtauksella, joka kulkee porassa olevien reikien läpi ja siten kuljettaa murskattua kallion kiveä maanpinnalle. Nesteenä voidaan käyttää kaasua, kuten ilmaa, tyyppiä tai maakaasua, mutta useimmiten käytetään ”mutaa” eli veden ja saven sekoitusta. Ilmaporaus, jossa porattava reikä puhdistetaan kompressorikäyttöisellä ilmavirralla, tekee reiän yleensä nopeammin, kuin mutaporaus. Kyseisellä teknologialla on kuitenkin vakavia ongelmia putken kontrolloinnissa, vakaudessa, porausputken eroosiossa ja veden käsittelyssä. (Bronicki, 2018b)



Kuva 15. Geotermisen poran poranterä (Srinivasan, 2016)

4.1.3 Paineen hallinta poratussa reiässä

Porauksen aikana henkilöstö ja välineet on suojattava kaivonreiän odottamattomilta painetulvilta. Öljy- ja kaasuporauksessa nämä painetulvat voivat tulla hiilivetynesteistä, jotka ovat juuttuneet läpäisemättömän kiven alle, joka pitää nesteitä paineessa, jotka ovat suurempia kuin poratun reiän nestepylvään staattinen pää. Geotermisissä toiminnoissa painetulvat tulevat kuumista muodostumissa, jotka lämmittävät huokosia tai poratun reiän nesteitä. Kummassakin tapauksessa on tärkeää pitää kontrolli poratun reiän nestepylvään painosta. Kaasua käytettäessä nestepylvään paino on vähäinen, mutta mudan kanssa nestetiheys vaihtelee veden painosta kolmenkertaiseen veden painoon. (Bronicki, 2018b)

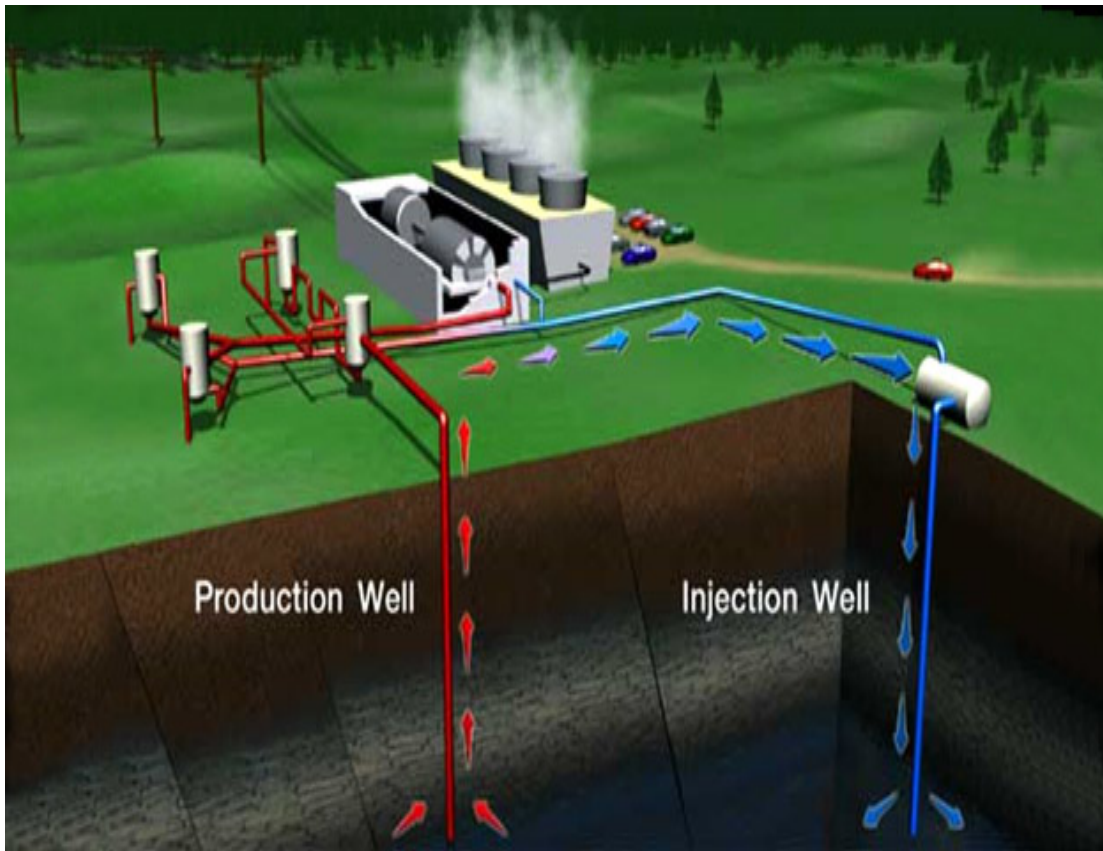
4.1.4 Poratun reiän halkaisijan ja suunnan säilyttäminen

Reikien stabiilisuus voi olla ongelma monista syistä, kun porataan tiettytyyppisten kivien läpi. Reiän muodostumisella on taipumus turvota silloin tällöin, sillä se imee vettä sisälleen. Reikä voi myös puristua, jos siihen tulee liikaa painetta. Molemmat tapaukset pienentävät reiän halkaisijaa. Nämä ilmiöt voivat aiheuttaa ongelmia, pora voi esimerkiksi juuttua kiinni, jolloin porattu reikä on välttämätön puhdistaa tai sitä on suurennettava. Kaasuporauksessa ei ole nestettä, joka aiheuttaisi turvotusta, mutta siinä ei ole myöskään nestepainetta, joka ehkäisee reiän puristumista. Mutaa käyttämällä nämä ongelmat voidaan usein poistaa tai lieventää nestepylvään paineella tai mudan kemiallisella koostumuksella. (Bronicki, 2018c)

Reiän suuntauksen ohjaamisessa on kaksi suurta osatekijää. Suuntaus pidetään suorana, tai suuntaporauksen tapauksessa porauksen suunnasta poiketaan sulavalla kaarella varmistaen, että porattava reikä etenee oikeassa paikassa oikeaan suuntaan. Reiän pitäminen suorana tai tasaisen kaarevana on välttämätöntä, jotta suojaputkea voidaan käyttää helposti; suojaputken juuttuminen porauksen aikana voi olla vakava ja kallis ongelma. (Bronicki, 2018c)

4.1.5 Poratun reiän kontrollointi

Kun reikä on porattu tavoiteltuun syvyyteen, se on pidettävä auki testausta tai tuotantoa (kuva 16) varten. Tämä tapahtuu yleensä laittamalla teräsputki tai -kotelo porattuun reikään, jonka jälkeen se sementoidaan paikalleen. Koteloa ei valmisteta yhdellä kertaa porauksen loputtua, vaan sitä tehdään sitä mukaa, kun poraus etenee. Kun jokaista kotelon osaa laitetaan ja sementoidaan paikalleen, täytyy koteloidun osuuden poratusta reiästä olla suurempi, kuin sen alapuolella oleva osa. Valmiissa reiässä on yleensä kaksi tai neljä sementoitua kotelon osaa. Tämän alla on avoin reikä, joka on reiästä haluttujen nesteiden tuottamiseen. (Bronicki, 2018d)



Kuva 16. Poratut reiät tuotannossa (*W.D.Hopper&Sons LTD*)

5 YHTEENVETO

Työn lähtökohtana oli selvittää geotermisen energian hyötyjä ja haittoja, geotermisten voimalaitosten eri tyypit ja toimintatavat, sekä poraustekniikkaa. Työtä tehtäessä huomattiin, että geotermisen energia uutetaan maasta polttamatta fossiilisia polttoaineita, eikä geotermiset alueet tuota juurikaan päästöjä. Sen lisäksi geotermisen energian avulla voidaan saavuttaa jopa 80% säästöt perinteiseen energiankäyttöön verrattuna.

Geotermisen energia on uusiutuva energianmuoto, ja sen suurin etu muihin uusiutuviin energianlähteisiin on se, että se on vakio; geotermistä energiaa on aina saatavilla riippumatta luonnonilmiöistä ja olosuhteista. Lisäksi huomattiin, että geotermiset lämpöpumppujärjestelmät käyttävät huomattavasti vähemmän sähköä, kuin tavanomaiset lämpö- ja jäähdytysjärjestelmät. Geotermisten lämpöpumppujärjestelmien etuna lisäksi on se, että niillä on pidempi käyttöikä, koska ne ovat suojassa rakennusten sisällä.

Geotermisiä voimalaitoksia käytetään sähkön tuottamiseen. Päätyyppisiä näissä voimalaitoksissa on kolme: kuivahöyryvoimalaitos (dry steam power plant), binäärisyklinen voimalaitos (binary cycle power plant) ja flash steam -voimalaitos, joka jakautuu vielä kolmeen tyyppiin; single-, double-, ja triple-flash steam -voimalaitoksiksi. Näistä voimalaitostyypeistä eniten maailmassa käytetään flash steam -voimalaitoksia.

Syöttövesi- ja tuotantoreikien porauksessa porauksen virtalähteenä käytetään kahta tai neljää dieselmoottoria. Porakoneet murtavat kallion kiveä pienemmiksi palasiksi ja lohkariksi, joita poistetaan poratusta reiästä vesivirtauksella. Ongelmaksi porauksessa voi tulla kivet, joiden läpi ei voi porata, jolloin ne pitää kiertää. Mikäli porauksen suuntaa aiotaan muuttaa, on elintärkeää, ettei poranterä juutu kiinni, koska siitä tulee kallis ongelma.

LÄHDELUETTELO

Alchetron (no date). Available at: <https://alchetron.com/Piero-Ginori-Conti> (Accessed: 29 August 2019).

Breeze, P. (2014) *Power Generation Technologies (2nd Edition)*. Available at: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpPGTE0001> (Accessed: 29 August 2019).

Bronicki, L. Y. (2018) *Power Stations Using Locally Available Energy Sources A Volume in the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology Series, Second Edition*. Available at: <http://www.springer.com/series/15436> (Accessed: 29 August 2019).

Cey, E. *et al.* (2017) *Energy Education*. Available at: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Geothermal_power_plants (Accessed: 28 August 2019).

DiRippo and Ronald (2016) *Geothermal Power Plants - Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact (4th Edition)*. Available at: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpGPPAC15> (Accessed: 29 August 2019).

Earth's Interior (2018). Available at: https://www.proprofs.com/quiz-school/story.php?title=earths-interior_4 (Accessed: 28 August 2019).

Energy Informative (no date). Available at: <https://energyinformative.org/geothermal-energy-pros-and-cons/> (Accessed: 28 August 2019).

Geothermal explained - U.S. Energy Information Administration (EIA) (2018). Available at: <https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/> (Accessed: 28 August 2019).

GreenMatch (2019). Available at: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/04/advantages-and-disadvantages-of-geothermal-energy> (Accessed: 28 August 2019).

El Haj Assad, M., Bani-Hani, E. and Khalil, M. (2017) 'Performance of geothermal power plants', *Geothermal Energy*. Springer Berlin Heidelberg, 5(1), p. 17. doi: 10.1186/s40517-017-0074-z.

NCPA (2015). Available at: <http://www.ncpa.com/wp-content/uploads/2015/02/ncpa-geo-01.jpg> (Accessed: 29 August 2019).

OpenEI (no date). Available at: https://openei.org/wiki/Binary_Cycle_Power_Plant (Accessed: 29 August 2019).

Randeberg, E. (2017) *Geothermal drilling-technologies and opportunities*. Available at: <http://www.eeagrants.agh.edu.pl/wp-content/uploads/2017/08/11-IRIS-Geothermal-drilling.pdf> (Accessed: 28 August 2019).

Richardson, I. and Addison, S. (2014) *Chemistry Challenges in Geothermal Power*

Generation. Available at:
https://www.researchgate.net/publication/283084139_Chemistry_Challenges_in_Geothermal_Power_Generation (Accessed: 29 August 2019).

Srinivasan, A. (2016) *Energy Central*. Available at:
<https://www.energycentral.com/c/ec/how-synthetic-diamond-industry-revolutionizing-geothermal-energy-market> (Accessed: 29 August 2019).

The Temperature of Earth's Interior – Physical Geology (no date). Available at:
<https://opentextbc.ca/geology/chapter/9-2-the-temperature-of-earths-interior/> (Accessed: 28 August 2019).

Vimeo (2010). Available at: <https://vimeo.com/7922399> (Accessed: 29 August 2019).

W.D.Hopper&Sons LTD. Available at:
http://www.wdhopperwaterwells.com/geothermal_drilling.php (Accessed: 29 August 2019).