

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

GEOTERMISEN ENERGIAN NYKYTILANNE JA TULEVAISUUS

Lappeenrannassa 15.10.2020
Elna Arokivi TkK 3

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Elna Arokivi

Geotermisen energian nykytilanne ja tulevaisuus

Kandidaatintyö 2020

Tarkastaja: Aki Grönman

Ohjaaja: Aki Grönman

30 sivua, 8 kuvaa, 2 kuvaajaa

Hakusanat: Geotermisen energia, geotermisen voimalaitos, geotermisen lämmöntuotanto

Tässä kandidaatintyössä käsitellään geotermisen energian nykytilannetta ja tulevaisuutta maailmassa. Työn tavoitteena on selvittää eri maiden ja yleisimpien teknologioiden tilanteet sekä luoda kuvaa geotermisen energian tulevaisuudelle maailmassa.

Työssä selvitetään geotermisen energian alkuperä ja käydään läpi geotermisen energiantuotannon etuja ja haasteita. Esitellään yleisimmät geotermisen sähkön- ja lämmöntuotannon voimalaitostyypit. Lisäksi käydään läpi eri maiden tilanteita geotermisen energiantuotannon kannalta nykyhetkessä ja tulevaisuutta ajatellen.

Kandidaatintyössä huomataan, että geotermisen energiantuotanto voi tulevaisuudessa olla luotettava ja ympäristöystävällinen peruskuorman ylläpitäjä. Hydrotermisten eli vettä sisältävien geotermisten energianlähteiden hyödyntäminen on alueellisesti hyvin rajattua. Toisaalta todetaan myös, että paranneltujen geotermisten systeemien ja geotermisen lämmöntuotannon hyödyntäminen on tulevaisuudessa lupaava mahdollisuus maailmanlaajuisesti.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	5
2	GEOTERMINEN ENERGIA	5
2.1	Esittely ja historiaa	5
2.2	Geotermisen lämmön muodostuminen.....	6
2.3	Geoterminen energia ympäristön kannalta	7
2.4	Kustannukset	8
2.5	Luotettavuus	9
3	GEOTERMISEN ENERGIAN TUOTANTO	9
3.1	Kuivahöyryvoimalaitokset	10
3.2	Flash-höyryvoimalaitokset	12
3.2.1	Single flash.....	12
3.2.2	Double ja triple flash.....	14
3.3	Binäärisyklinen voimalaitos	14
3.4	EGS.....	15
3.5	Lämmöntuotanto.....	17
4	GEOTERMINEN ENERGIA MAAILMASSA NYT JA TULEVAISUUDESSA.....	19
4.1	Geoterminen sähköntuotanto maailmassa	20
4.1.1	Yhdysvalloissa on suuri geotermisen energian kapasiteetti.....	21
4.1.2	Indonesiassa on maailman suurin geotermisen energian potentiaali	22
4.2	Suoran lämmöntuotannon tilanne maailmassa	23
4.2.1	Suomeen on rakenteilla ensimmäinen geoterminen lämpövoimalaitos.....	24
5	YHTEENVETO	25
	LÄHTEET	27

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

°C	Celsiusaste
GW	Gigawatti
GWh	Gigawattitunti
kW	Kilowatti
MW	Megawatti
MWh	Megawattitunti
ORC	Organic Rankine Cycle
USD	Yhdysvaltain dollari

Alaindeksit

e	sähkö
---	-------

1 JOHDANTO

Uusiutuvan energian käyttö on lisääntynyt viime vuosina merkittävästi maailmassa. Uusiutuvan ja päästöttömän energiantuotannon avulla on pyritty osallistumaan taisteluun ilmastomuutosta vastaan. Geoterminen energia on kiinnostava uusiutuvan energian muoto, jolla on potentiaalia osana tulevaisuuden energiaratkaisuja. Tämän työn aiheena on geotermisen energian nykytilanne ja tulevaisuus maailmassa. Tavoitteena on selvittää eri maiden ja teknologioiden tilanne tällä hetkellä ja luoda kuvaa geotermisen energiantuotannon tulevaisuudelle.

Työssä käydään läpi geotermisen energiantuotannon historiaa, sen nykytilannetta ja vaikutusta ympäristöön sekä kustannuksia ja luotettavuutta. Esitellään yleisimmät geotermisen sähköntuotannon voimalaitostyyppit ja niiden toimintaperiaate. Käydään lyhyesti läpi myös tällä hetkellä suosituimmat geotermisen lämmöntuotannon teknologiat. Lisäksi listataan maat, joissa geotermisen sähkön- ja lämmöntuotannon asennettu kapasiteetti on suurinta maailmassa. Käydään tarkemmin läpi sähkön- ja lämmöntuotannon kannalta kiinnostavia maita, niiden tulevaisuutta ja nykytilannetta geotermisen energiantuotannon kannalta. Lopuksi pohditaan koottujen tietojen avulla, miltä geotermisen energian ja teknologioiden sekä maiden tilanne näyttää tulevaisuudessa osana uusiutuvan energian palettia.

2 GEOTERMINEN ENERGIA

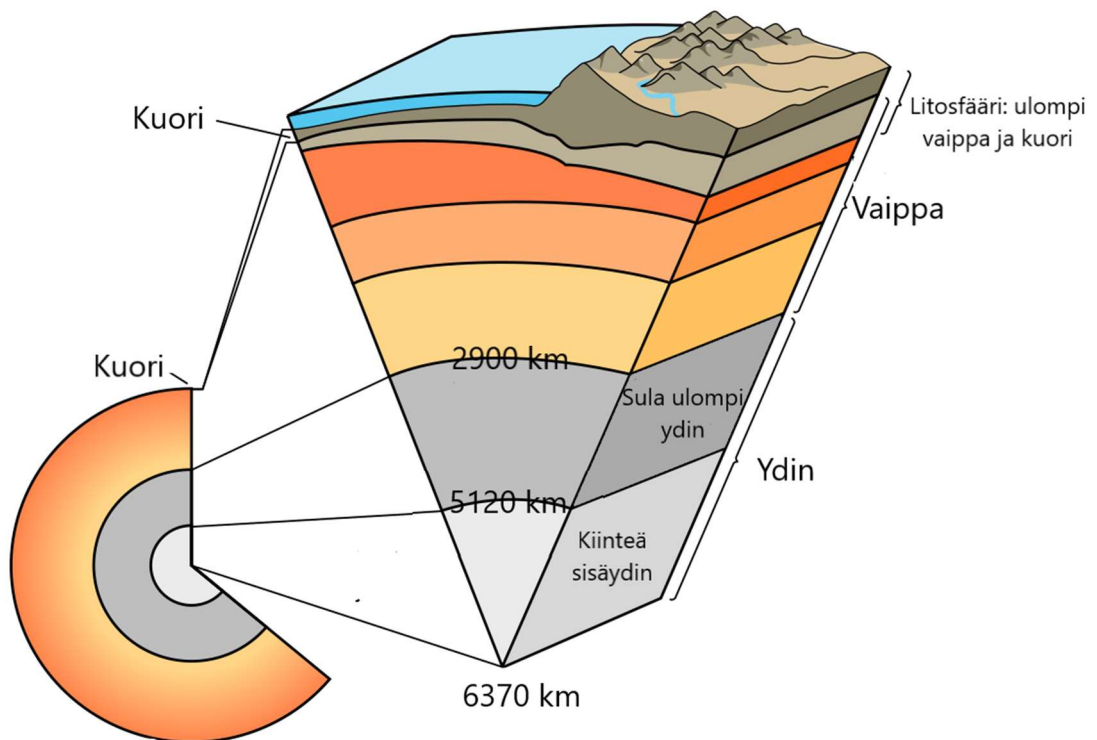
2.1 Esittely ja historiaa

Geoterminen energia on maankuoren sisällä syntyvää lämpöä. Ihminen on hyödyntänyt geotermistä energiaa jo vuosisatojen ajan. Kuumia lähteitä on käytetty historian aikana esimerkiksi peseytymiseen ja kylpemiseen. Sähköä onnistuttiin tuottamaan geotermisen energian avulla Italian Lardellosa ensimmäisen kerran jo 1900-luvun alkupuolella. (O’Keefe et. al, 2010.) Ensimmäinen geoterminen voimalaitos valmistui Lardellosa vuonna 1913 ja se oli teholtaan 250 kW (Golušin et. al, 2013). Nykyisin geotermistä energiaa hyödynnetään laajasti ja tällä hetkellä geotermisten voimalaitosten yhteenlaskettu kapasiteetti maailmassa on

13 909 MW (IRENA, 2020). Geotermistä energiaa hyödynnetään sähköntuotannon lisäksi lämmön tuotannossa (EIA, 2019).

2.2 Geotermisen lämmön muodostuminen

Geotermistä lämpöä muodostuu maanpinnan alla kahdella tavalla. Lämpöä syntyy luonnollisesti tapahtuvan radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Maan alla radioaktiivisesti hajoavia aineita ovat radioisotoopit kuten uraani-238 (O’Keefe et. al, 2010). Tämän lisäksi maapallon syntymisen yhteydessä muodostunutta lämpöä kulkeutuu edelleen ytimestä kohti maan kuorta (Manzella, 2015). Maapallon rakenne on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Poikkileikkaus maapallon rakenteesta. Maapallon ulompi ydin on 2900 kilometrin syvyydellä, kiinteä sisäydin 5120 kilometrin syvyydellä ja keskipiste arviolta 6370 kilometrin syvyydellä mitattuna maan pinnasta. (muokattu: Wikimedia commons, 2013.)

Kuvasta 1 nähdään, että maapallon keskellä on sisäydin, ja se koostuu kiinteästä raudasta (EIA, 2019). Lämpötila sisäytimessä on arvioitu olevan noin 4200°C (Hodge, 2010). Sisäytimen ympärillä on ulkoydin, joka koostuu sulasta kivistä eli magmasta. Ydintä ympäröi sisempi vaippa, joka koostuu magmasta ja kiinteästä kivistä. (EIA, 2019.) Kuvassa 1 esitetyn

rakenteen uloimmat osat, vaipan uloin osa ja kiinteä kuori, muodostavat yhdessä litosfäärin. Kuori koostuu mannerlaatoista, joiden liitoskohdista magmaa pääsee maan pinnalle ja näin aiheuttaa vulkaanista ja seismistä toimintaa. (Hodge, 2010). Kuten kuvasta 1 nähdään, kuori on uloin kerros ja sen paksuus vaihtelee geologisten olosuhteiden mukaan. Esimerkiksi merialueilla kuoren paksuus on keskimäärin kuusi kilometriä, kun manneralueilla keskimääräinen paksuus on noin 40 kilometriä. (Haapala, 2012.) Nykyisin tätä maan alla syntyvää lämpöä hyödynnetään yleisimmin hydrotermisesti: maan alle kivien rakoihin valuu luonnossa jatkuvasti vettä, ja lämpöä siirtyy magmasta veteen. Kuumentunutta vettä tai höyryä voidaan hyödyntää energian tuotannossa.

2.3 Geoterminen energia ympäristön kannalta

Geotermistä energiaa pidetään ympäristöystävällisenä ja se määritellään uusiutuvaksi, lähes päästöttömäksi energiamuodoksi. Mutta kuten kaikilla energiantuotannon muodoilla, myös geotermisellä energiantuotannolla on vaikutusta ympäristöön. Suurimmat geotermiseen energiantuotantoon liittyvät ympäristöhaittojen aiheuttajat ovat veden poisto maaperästä, melu sekä haitalliset päästöt ilmaan ja maaperään. (Kristmannsdóttir ja Ármannsson, 2003.)

Veden poistaminen maaperästä voi aiheuttaa monia haittoja ympäristölle. Veden pois pumpaaminen voi johtaa maan vajoamiseen. Maan vajoaminen on ongelma, sillä se voi aiheuttaa esimerkiksi rakennusten vaurioitumista ja sortumista. Vedenpoisto voi myös johtaa pohjavesien pinnantason alenemiseen. Myös geysirit tai kuumat lähteet saattavat kadota alueelta vedenpoiston seurauksena. Haittoja voidaan ehkäistä korvaamalla poistettu vesi tai palauttamalla prosessissa käytetty vesi sinne, mistä sitä on pumpattu. Haittojen ehkäisemiseksi on tärkeää pitää poisto- ja tulo-vesivirrat tasapainossa. (Kristmannsdóttir ja Ármannsson, 2003.)

Melua aiheutuu geotermisen voimalaitoksen rakennusvaiheessa ja voimalaitoksen varsinaisen toiminnan aikana. Rakennusvaiheen poraaminen aiheuttaa merkittäviä meluhaittoja, se voi aiheuttaa jopa 90 desibelin melutason. Voimalaitoksen normaali toiminta ei tyypillisesti ylitä 45:ttä desibeliä. (Kristmannsdóttir ja Ármannsson, 2003.) 45 desibeliä on raja, jonka jälkeen melu voidaan määritellä häiritseväksi (Jauhiainen et. al, 2007). Melu voi häiritä

ihmisten lisäksi monien eläinlajien toimintaa, kuten esimerkiksi lintujen pesintää. Meluhaittoja voidaan estää erilaisilla äänenvaimentimilla (DiPippo, 2016).

Päästöt maaperään ja ilmaan johtuvat lähinnä veden takaisinruiskutuksesta ja höyryn vapautumisesta ympäristöön. Maahan takaisinruiskutettava vesi voi sisältää monia maaperälle haitallisia aineita kuten arsenikkia, litiumia ja silikonia. Nämä aineet voivat esimerkiksi pilata pohjavesialueita, mikäli ei huolehdita, että vesi ruiskutetaan takaisin alkuperäiseen ottopaikkaan. Ilmaan päästöjä vapautuu höyryn mukana. Ilmaan voi päästä rikkivetyä, hiilidioksidia ja metaania esimerkiksi prosessin vuotokohdasta. (DiPippo, 2016.) Geotermisen energiantuotannon hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin pieniä verrattuna muihin energiantuotantotapoihin. Hiilidioksidipäästöjen on arvioitu olevan keskimäärin noin 55 grammaa kilowattituntia kohden. Tämä on noin 10 prosenttia esimerkiksi maakaasulla tuotetun energian aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. (Ngô ja Natowitz, 2016.)

Geoterminen voimalaitos ja sen rakentaminen häiritsevät ympäristöä myös muilla tavoin. Poraamisesta aiheutuva värinä voi aktivoita seismistä toimintaa maaperässä, sillä poraaminen tapahtuu usein vulkaanisilla alueilla. Myös muut maanpinnanhäiriöt kuten maanjäristykset ovat mahdollisia. Värinä voi aiheuttaa myös maanvyöryjä. (Kristmannsdóttir ja Ármannsson, 2003.)

Geoterminen voimalaitos muuttaa myös alueen maisemaa ja ympäristöä, joissakin tapauksissa jopa lopullisesti. Suunnittelussa onkin suosittava neutraalin värisiä ja matalia rakennuksia ja luonnon kannalta erityisiä alueita tulee suojella rakentamiselta. (DiPippo, 2016.) Kuitenkin geoterminen energia on maankäytön kannalta ympäristöystävällinen vaihtoehto. Geoterminen laitos vie huomattavasti vähemmän tilaa kuin saman verran energiaa muilla menetelmillä tuottavat voimalaitokset. (Ngô ja Natowitz, 2016.)

2.4 Kustannukset

Geotermisillä projekteilla on usein korkeat pääomakustannukset. Alkuvaiheen kustannukset esimerkiksi 50 MW_e laitokselle vaihtelevat 2,8-5,5 miljoonaan USD/MW_e. Vaihtelevuus johtuu rakennuskohteiden erilaisista maantieteellisistä olosuhteista, geotermisen ener-

gianlähteen laadusta ja infrastruktuurista. Geotermisen energianlähteen laadulla viitataan esimerkiksi lämpötilaan. Investointikuluista suurimman osan muodostavat rakentamis- ja porauskulut. Noin 35 prosenttia investointikuluista menee rakentamiseen ja 34 prosenttia poraamiseen. (Manzella, 2015.) Rakennusvaiheessa poraaminen on kallis toimenpide: yhden kaivon poraaminen maksaa 150 000-250 000 USD (Aswatharayana et. al, 2010).

Yleensä projektien käyttökustannukset ovat matalia. Geotermisen voimalaitos pystyy kilpailemaan kustannusten osalta fossiilisia polttoaineita käyttävien voimalaitosten kanssa, sillä geotermisellä voimalaitoksella ei ole esimerkiksi jatkuvia polttoainekuluja. (Uyar, 2017.) Lisäksi geotermisen laitoksen pitkä käyttöikä luo lisää kilpailukykyä.

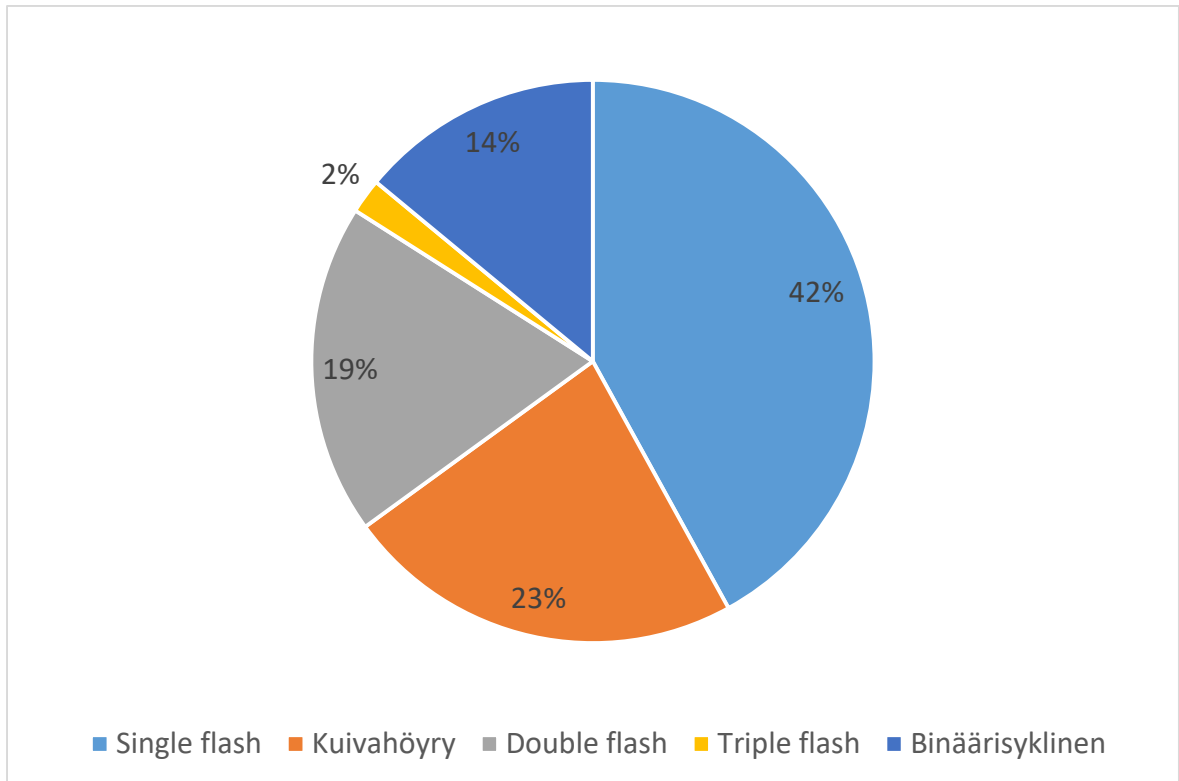
2.5 Luotettavuus

Verrattuna tuuli- ja aurinkovoimalla tuotettuun energiaan, geotermisen energia on luotettava tuotantomuoto. Geotermisen energian tuottaminen ei riipu säästä, vuorokaudenajasta tai vuodenaajasta kuten nykyisten tuuli- ja aurinkovoimaloiden toiminta riippuu. Tämän vuoksi geotermisen energia on potentiaalinen peruskuorman ylläpitäjä osana tulevaisuuden energianäkyä. (Aswathanarayana, 2010.)

3 GEOTERMISEN ENERGIAN TUOTANTO

Geotermisen energianlähteen avulla voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä. Sähköntuotantoon soveltuvat hydrotermiset kohteet, eli kohteet, joissa geotermisen energia on maan alla varastoituneena veteen tai höyryyn. Sähköä voidaan tuottaa voimalaitoksessa ja lämpöä voidaan hyödyntää suoraan esimerkiksi rakennusten lämmittämiseen ja teollisuuden prosesseihin. (Aswathanarayana, 2010) Geotermisen voimalaitos toimii samalla periaatteella kuin muutkin energiaa tuottavat voimalaitokset, mutta sen rakenne ja toimintaperiaate on yleensä huomattavasti yksinkertaisempi.

Geotermisiä voimalaitoksia on useita eri tyyppejä. Kuivahöyry-, flash-höyry- ja binäärisykliset voimalaitokset ovat yleisimmin maailmassa käytössä olevat geotermiset voimalaitostyypit. Voimalaitostyyppin valinta riippuu esimerkiksi kohteessa maan alta tulevan höyryn tai nesteen lämpötilasta ja veden olomuodosta. (Anderson ja Rezaie, 2019.)

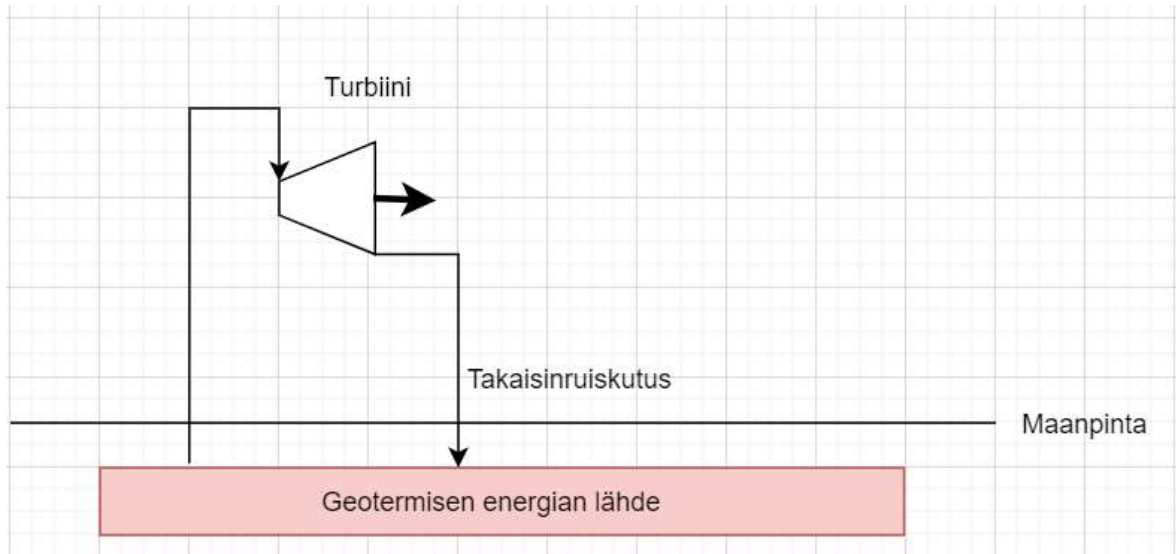


Kuva 2: Voimalaitostyyppien jakautuminen 2015 (lukujen lähde Anderson ja Rezaie, 2019)

Kuvasta 2 nähdään eri voimalaitostyyppien jakauma. Flash-höyryvoimalaitosten osuus on selkeästi suurin. Toiseksi suurimman osuuden muodostavat kuivahöyryvoimalaitokset. Noin 14 prosenttia geotermisistä voimalaitoksista on binäärisyklisiä voimalaitoksia. (Anderson ja Rezaie, 2019.)

3.1 Kuivahöyryvoimalaitokset

Kuivahöyryvoimalaitos oli ensimmäinen kaupallinen geotermisen voimalaitos. Tämä ensimmäinen sovellus syntyi Italiassa ja se oli 15 kW höyrykone. Vuonna 2014 koko maailmassa asennetusta geotermisen energian kapasiteetista noin 24 prosenttia oli kuivahöyryvoimalaitoksia. Samana vuonna yhden kuivahöyrylaitoksen teho oli keskimäärin 42,1 MW. Kuivahöyryvoimalaitos sopii kohteeseen, jossa geotermisen resurssi on korkeapaineista ja kuumaa höyryä. Geotermisen lähteen lämpötilan on oltava vähintään 250°C (Aswathanarayana, 2010). Sopivan lähteen höyry ei sisällä nestettä maan pinnalle tullessaan, eli se on nimensä mukaisesti kuivaa. Laitoksen rakenne ja toimintaperiaate ovat yksinkertaiset. Kuivahöyryvoimalaitoksen yksinkertaistettu rakenne on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Kuivahöyryvoimalaitoksen yksinkertaistettu rakenne. Kuuma höyry tulee porausreikää pitkin ylös turbiinille ja pyörittää sitä. Takaisinruiskutus on tärkeä osa prosessia

Kuvasta 3 nähdään, kuinka korkeapaineinen, kuuma höyry ohjataan maan alta geotermisestä lähteestä turbiinille, joka pyörittää generaattoria ja tuottaa sähköä. Turbiinilta tuleva geotermisen aine ruiskutetaan takaisin alkuperäiseen paikkaan käytön jälkeen.

Kuivahöyryvoimalaitoksilla on korkeat hyötysuhteet verrattuna muihin geotermisiin voimalaitoksiin. Korkea hyötysuhde johtuu siitä, että maan alta saatava kuuma ja kuiva höyry voidaan käyttää lähes sellaisenaan, eikä esimerkiksi separaattoria tarvita. Lisäksi voimalaitoksen rakenne on usein yksinkertainen. Komponenttien vähäisen määrän ja korkealämpötilaisen geotermisen energianlähteen vuoksi kuivahöyryvoimalaitos on myös edullinen verrokkieihin nähden.

Toisaalta tarpeeksi korkean lämpötilan resursseja on vain harvoissa kohteissa, joten lämpötila- ja kuivuusvaatimus voivat rajoittaa kuivahöyrytekniikan käyttöä. Merkittäviä, suuria kuivahöyrylaitoksia onkin maailmassa vain harvoissa kohteissa, esimerkiksi The Geysers Yhdysvalloissa ja Larderello Italiassa. Rajallisten geotermisten kohteiden lisäksi materiaalien kestävyys luo haasteita kuivahöyrylaitosten suunnitteluun. Maan alta tuleva höyry aiheuttaa korroosiota rakenteisiin ja erityisesti turbiinille. (Anderson ja Rezaie, 2019.) Turbiinille

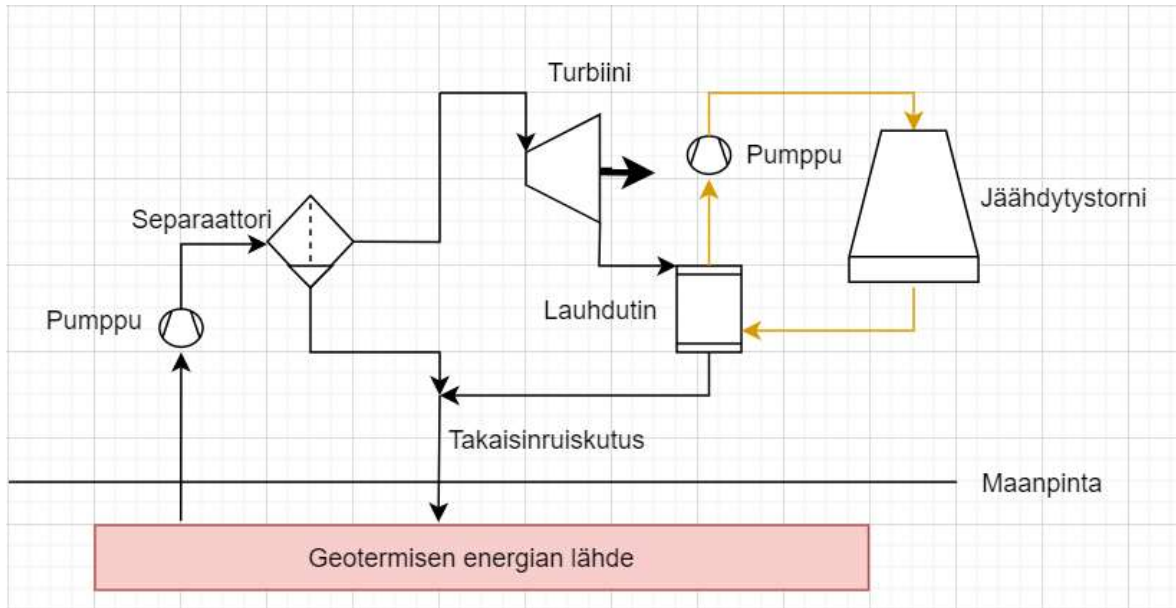
nin ja putkistojen korroosio aiheuttavat lisäkustannuksia laitokselle. Vaurioituessaan turbiinin hyötysuhde laskee ja turbiinit ovat kalliita, joten korroosion ehkäisy materiaalivalintojen avulla on tärkeää.

3.2 Flash-höyryvoimalaitokset

Flash-höyryvoimalaitokset soveltuvat kohteisiin, jossa geoterminen lämmönlähde koostuu kuumasta, korkeapaineisesta neste-kaasuseoksesta. Lähteen lämpötilan on oltava vähintään 175°C. (Aswathanarayana, 2010) Flash-höyryvoimalaitokset jakautuvat single-, double- ja triple flash-laitoksiin. Kuvasta 2 nähdään, että näistä yleisimmät vuonna 2014 olivat single ja double flash. Vain pieni osa voimalaitoksista on triple flash-laitoksia. Nimet kuvastavat separaattorien määrää voimalaitoksessa. Separaattorin tehtävä on erottaa lähteen höyry-nesteseoksen faasit toisistaan, yleensä tiheyseroa hyödyntäen. (DiPippo, 2016)

3.2.1 Single flash

Single flash on yleisin flash-höyryvoimalaitos. Single flash -laitokset muodostivat vuonna 2014 noin 43 prosenttia koko maailmassa asennetusta geotermisten voimalaitosten kapasiteetista. Yhden laitoksen teho oli samana vuonna keskimäärin 28 MW. Single flash -laitoksessa on yksi separaattori, joka erottaa geotermisestä lähteestä pumpatun höyryn ja nesteen. Höyry ohjataan tästä turbiinille, joka pyörittää generaattoria. Generaattori tuottaa sähköä. Turbiinilta höyry ohjataan lauhduttimelle ja edelleen vetenä takaisin maaperään. Separaattorissa höyrystä erotettu neste ruiskutetaan myös takaisin maaperään. (DiPippo, 2016.) Single flash -voimalaitoksen toimintaperiaate ja komponentit on esitelty kuvassa 4.



Kuva 4: Single flash -voimalaitoksen rakenne. Geotermisen nesteen ja höyryn kulku on kuvattu ohuilla mustilla nuolilla ja oranssit nuolet kuvaavat jäähdytysveden kulkusuuntaa.

Flash-voimalaitosten haasteet liittyvät suurelta osin materiaalien kestävyys- ja painehäviöihin. Maan alta tuleva korkeapaineinen geotermisen höyry-nesteseos sisältää runsaasti erilaisia materiaaleja kuluttavia aineita. Tämän vuoksi flash-voimalaitoksilla käytetty putkisto ja turbiinimateriaalit tulee testata kunnolla etukäteen ja käyttää vain hyvin kestäviä materiaaleja. Lisäksi haasteita aiheuttaa höyryn kosteus turbiinille mennessä. Kosteus on epäedullinen ominaisuus, sillä se aiheuttaa korroosiota putkistoissa ja turbiinissa. Kosteaa höyryä aiheuttamia ongelmia voidaan minimoida huolehtimalla, että höyryn ja nesteen erotusprosessi on mahdollisimman toimiva. Lisäksi separaattorin jälkeen voidaan asettaa erillinen kosteudenpoistaja kuivaamaan höyryä. Myös separaattorin ja turbiinin välillä olevaan putkistoon voidaan lisätä kosteutta poistavia elementtejä kondensoitumisen varalle. Höyryn painehäviöt ovat lisähaaste, sillä osassa putkistoja on sisällä kaksifaasinen aine. Putkistohäviöitä voidaan vähentää oikeanlaisella putkistosuunnittelulla, esimerkiksi valitsemalla sopiva putken halkaisija. (DiPippo, 2016)

Flash-höyrylaitosten ympäristövaikutukset koostuvat pääosin ilmansaasteista ja maaperään joutuvista aineista. Ilmaan saasteet pääsevät höyryn mukana. Höyry voi sisältää muun muassa rikkivetyä, hiilidioksidia ja metaania. Ilmansaasteita voidaan pyrkiä minimoimaan pois-

tamalla haitallisia aineita erilaisin teknologioin ennen höyryn päästämistä ilmaan. Maaperään saasteita pääsee geotermisen nesteen takaisinruiskutuksen yhteydessä. Näitä haitallisia aineita ovat esimerkiksi arsenikki, litium ja silikoni. Nämä aineet voivat pilata pohjavettä, ja siksi on huolehdittava, että neste palautetaan tarkasti takaisin alkuperäiseen paikkaan eikä esimerkiksi pohjavesialueelle. (DiPippo, 2016.)

3.2.2 Double ja triple flash

Double flash -laitoksessa hyödynnetään enemmän geotermisen lähteen sisältämästä energiasta. Se voi tuottaa 10-15 prosenttia enemmän energiaa ja omata paremman hyötysuhteen verrattuna samankaltaisiin olosuhteisiin rakennettuun single flash -laitokseen. Double ja triple flash -laitokset ovat kuitenkin myös single flashia kalliimpia ja ne vaativat enemmän huoltotoimenpiteitä. (DiPippo, 2016).

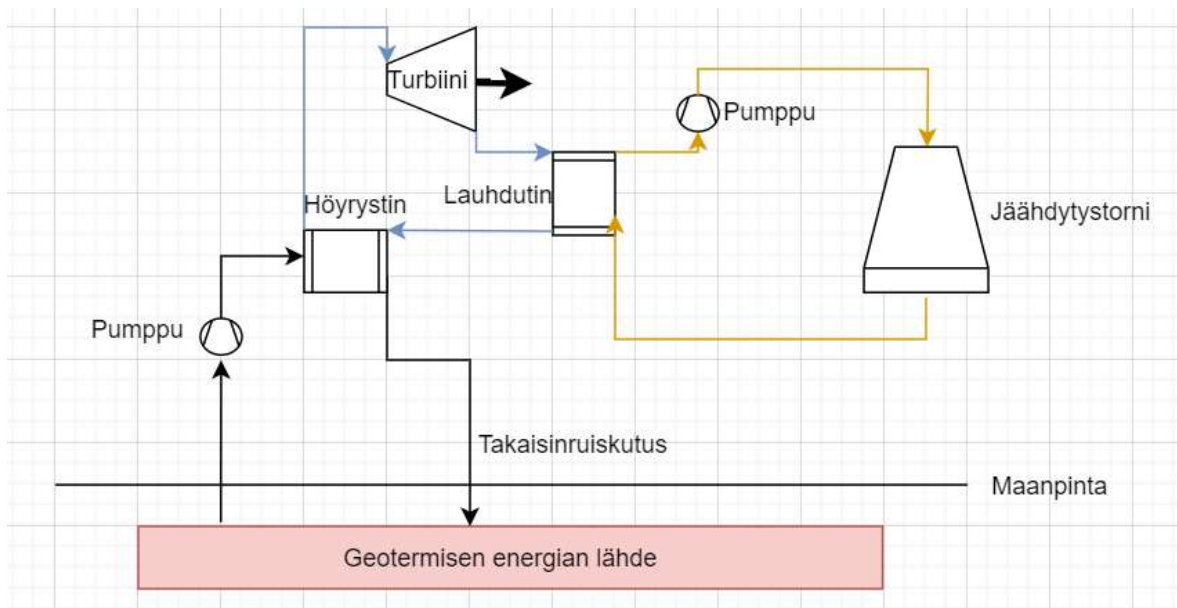
Double flash -laitoksen rakenne on hieman single flashia monimutkaisempi. Rakenne on muuten samankaltainen kuin kuvassa 4 esitetty, mutta korkeapaineseparaattorin jälkeen kuuma neste ohjataan matalapaineseparaattorille. Toisella separaattorilla saadaan erotettua matalapaineista höyryä, joka johdetaan turbiinille. Vesi johdetaan takaisin maaperään. Triple flash-laitoksessa on sama toimintaperiaate, mutta separaattoreita on yhteensä kolme. (DiPippo, 2016).

Double ja triple flash -laitoksilla on pääosin samoja haasteita kuin single flash -laitoksilla. Painehäviöt ja ympäristövaikutukset on huomioitava. Lisäksi mitä useamman erotusprosessin geotermisen neste käy läpi, sitä väkevämpää se on haitallisten aineiden suhteen. Tämän nesteen palautuksesta takaisin alkuperäiseen paikkaan on huolehdittava tarkasti. (DiPippo, 2016.)

3.3 Binäärisyklinen voimalaitos

Binääri- eli ORC-voimalaitos sopii kohteisiin, jossa geotermisen lähteen lämpötilaltaan matala, noin 85°C (Aswathanarayana et. al, 2010). Kuvasta 2 nähdään, että maailman geotermisistä voimalaitoksista noin 14 prosenttia on binäärivoimalaitoksia. Binäärivoimalaitokset ovat yleensä pienen kokoluokan voimalaitoksia, keskimääräinen teho sijoittuu yleensä

parista sadasta kilowatista muutamiin megawatteihin (Manzella, 2015). ORC-voimalaitoksessa kiertoaineena on geotermisen nesteen sijaan orgaaninen aine, joka kiertää suljetussa sekundääripiirissä. Geotermisen neste tai neste-höyry-yhdistelmä johdetaan maan alta lämmönsiirtimeen, jossa se lämmittää erillisessä piirissä kulkevan kiertoaineen. Kiertoaine kuumenee ja höyrystyy ja höyry ohjataan turbiinille. (DiPippo, 2016.) Binäärivoimalaitoksen yksinkertaistettu toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 5.

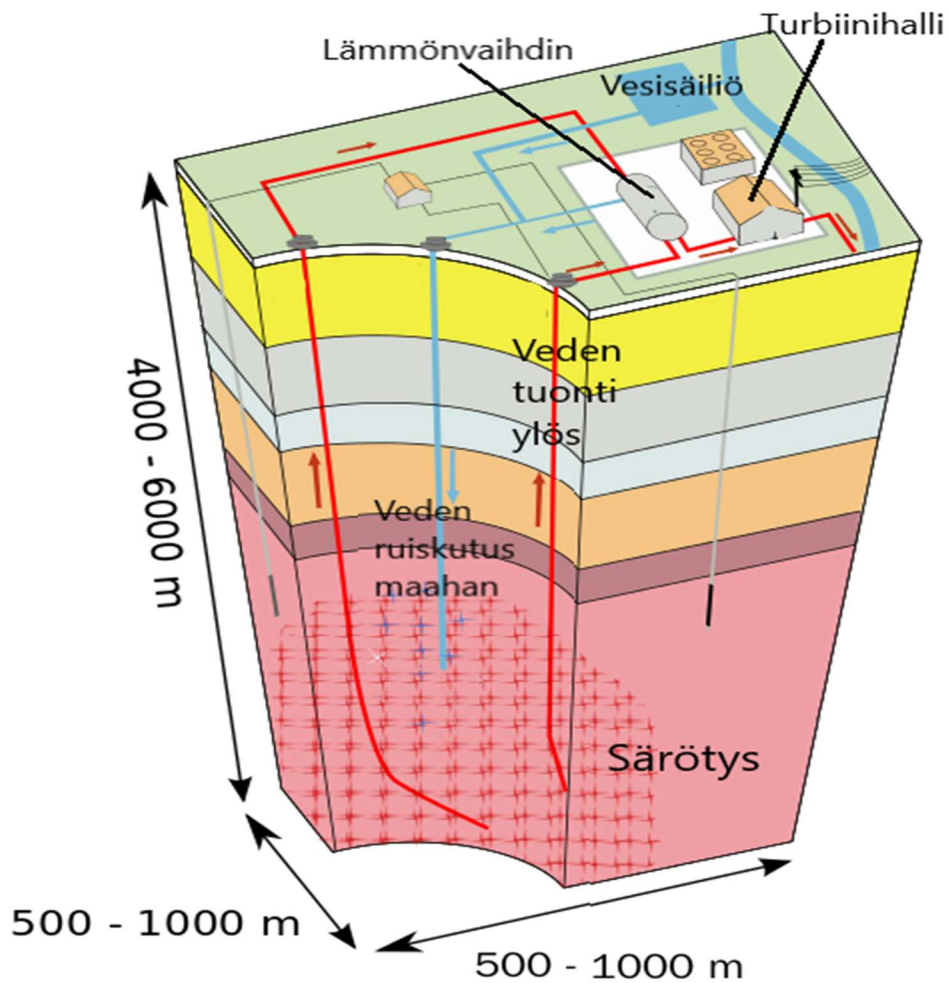


Kuva 5: Binäärivoimalaitoksen rakenne. Ohuet mustat nuolet kuvaavat geotermisen nesteen kulkusuuntaa, siniset nuolet kuvaavat orgaanisen kiertoaineen suuntaa ja oranssit nuolet jäähdytysveden suuntaa.

Binäärisyklisen voimalaitoksen etuna on yleensä muita vaihtoehtoja korkeampi hyötysuhde ja alempi geotermisen lähteen lämpötilavaatimus. Alemman lämpötilan geotermisiä kohteita on maapallolla huomattavasti enemmän kuin korkean lämpötilan omaavia. (Golušin et. al, 2013.)

3.4 EGS

EGS tulee englannin kielen sanoista Enhanced Geothermal Systems eli suomeksi parannellut geotermiset systeemit. EGS soveltuu kohteisiin, joissa geotermisen energian lähde on kuiva eli se ei sisällä tarpeeksi vettä. Tämä tarkoittaa, että geotermisen lämpö saadaan kuumasta kallioperästä syöttämällä sen sisälle vettä. (Manzella, 2015.) Seuraavassa kuvassa on esitelty havainnollistava esimerkki parannellusta geotermisestä systeemistä.



Kuva 6: Paranneltu geoterminen systeemi. Särötys tapahtuu noin 4-6 km syvyydellä. Vesi ruiskutetaan maahan (sininen nuoli), josta se kulkee kallioperän säröjen läpi ylöstuontikaivoihin (punaiset nuolet). (Muokattu: Wikimedia commons, 2009.)

Kuvasta 6 nähdään, että maahan porataan kaivoja, joista yhdestä syötetään vettä maaperään. Vesi ohjataan kuumen kallioperän läpi toiseen kaivoon, josta höyrystynyt, kuuma vesi tuodaan maan pinnalle. Tästä höyry tai vesi ohjataan turbiinille, joka pyörittää generaattoria ja generaattori tuottaa sähköä.

Veden kierron ja tehokkaan energianhyödyntämisen mahdollistamiseksi kallioperää usein säröytetään, jotta vesi pääsee virtaamaan kallion läpi. Näin lämpö pääsee siirtymään kallioperästä veteen tehokkaasti. Säröyttäminen tapahtuu ohjaamalla korkeapaineista vettä maaperään. (Hodge, 2010.)

Parannellun geotermisen systeemin etuna on sen maantieteellisesti laaja potentiaali. Tekniikan hyödyntäminen ei vaadi korkean lämpötilan omaavaa, vettä sisältävää geotermisen energian lähdettä. (Hodge, 2010.) Toisaalta säröytyksestä johtuen EGS voi aiheuttaa alueella seismistä aktiivisuutta kuten maanjäristyksiä. Lisäksi veden kulutus on huomattavan suurta. Esimerkiksi pieni, viiden megawatin laitos kuluttaisi 8500 t/d vettä. (Aswathanarayana et al, 2010.)

EGS ei ole vielä laajalti kaupallisessa käytössä, sillä kustannukset ovat korkeat. 4-6 kilometrin syvyydelle poraaminen on vielä hyvin kallista. Paranneltuja geotermisiä systeemeitä kuitenkin tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti. Tutkimusten tavoitteena on luoda kilpailukykyinen energiantuotantomuoto, joka soveltuu kuiviin geotermisen energian lähteisiin. (Manzella, 2015.)

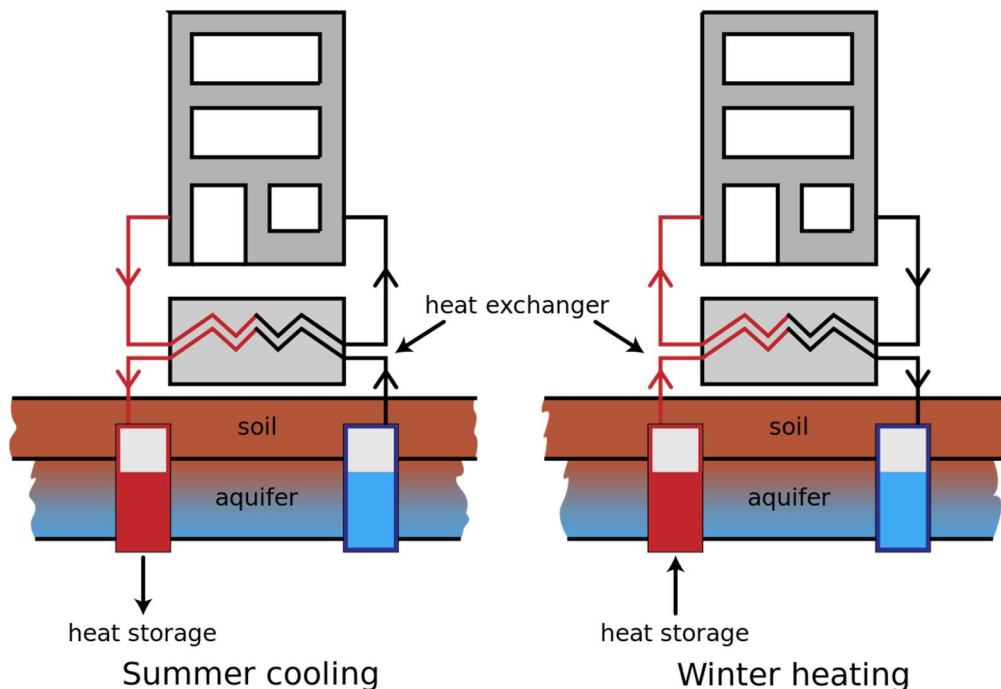
3.5 Lämmöntuotanto

Geotermisen energian lähteitä, joiden lämpötila luokitellaan matalaksi (20-150°C), voidaan hyödyntää suoraan lämmöntuotantoon. Lähellä maanpintaa sijaitseva geotermisen lämpö on peräisin auringosta. Aurinko lämmittää maan pintaa ja tätä lämpöä voidaan hyödyntää. Syvemmällä sijaitseva lämpö on peräisin maankuoren sisältä. Yleisiä suoran lämmöntuotannon sovelluksia ovat geotermiset lämpöpumput, kaukolämmön tuotanto, rakennusten, kasvihuoneiden ja kalanviljelylaitosten lämmitys. (Hinrichs ja Kleinbach, 2013.) Lisäksi sähkön ja lämmön yhteistuotanto eli CHP on mahdollinen sovellus kuivahöyry- ja flash-höyryvoimalaitosten yhteydessä. (Moya et. al, 2018.)

Lämmöntuotantoon sopivissa kohteissa geotermisen aine on yleensä nestemäistä, kuumaa vettä. Toimintaperiaate on yksinkertainen: kuuma vesi pumpataan maan alta ja se ohjataan

lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirtimessä kuuma vesi luovuttaa lämpöä toisessa piirissä virtaavalle nesteelle, joka edelleen virtaa lämmittämään haluttua kohdetta. (Aswathanarayana et. al, 2010.)

Suosittu tapa hyödyntää geotermistä lämpöä ovat geotermiset lämpöpumput. Lämpöpumpun etu on se, että sitä voidaan käyttää sekä lämmitykseen talvella että viilennykseen kesällä. Geotermisen lämpöpumpun toiminta perustuu siihen, että maasta saadaan geotermistä lämpöä talvella ja kesällä maahan voidaan johtaa lämpöä. (Hodge, 2010.) Seuraavassa kuvassa esitetään yksinkertaistetut tapaukset rakennuksen viilennyksestä ja lämmityksestä.



Kuva 7: Havainnekuva geotermisen lämpöpumpun avulla tapahtuvasta rakennuksen viilentämisestä kesällä (vasemmalla) ja lämmittämisestä talvella (oikealla). Kesällä lämpöä poistetaan rakennuksesta maaperään ja talvella lämpöä tuodaan maaperästä rakennukseen. (Wikimedia commons, 2008.)

Kuvassa 7 nähdään maassa oleva piiri ja siihen lämmönsiirtimellä yhteydessä oleva lämpöpumpun piiri. Lämpöpumpussa kiertää työaine, jota lämmitetään tai viilennetään geotermisen nesteen avulla lämmönsiirtimen kautta. Geotermisen neste ja lämpöpumpun työaine kiertävät siis erillisissä piireissä eivätkä sekoitu. (Hodge, 2010.)

4 GEOTERMINEN ENERGIA MAAILMASSA NYT JA TULEVAISUUDESSA

IRENA:n (International Renewable Energy Agency) tilastojen mukaan vuoden 2019 lopussa koko maailmassa asennettu geotermisen energian kapasiteetti on 13,9 GW. Maailmanlaajuisesti kapasiteetti on ollut selvässä nousussa vuodesta 2010 lähtien. Kasvu on kuitenkin hillittyä verrattuna IRENAn tilastojen vastaaviin aurinko- tai tuulivoiman kapasiteetin kasvuun vuosina 2010-2019. (IRENA, 2020.) Korkean lämpötilan omaavat hydrotermiset geotermisen energian reservit sijaitsevat mannerlaattojen liitoskohtien läheisyydessä. Mannerlaattojen sijoittuminen maapallolla on esitelty kuvassa 8.

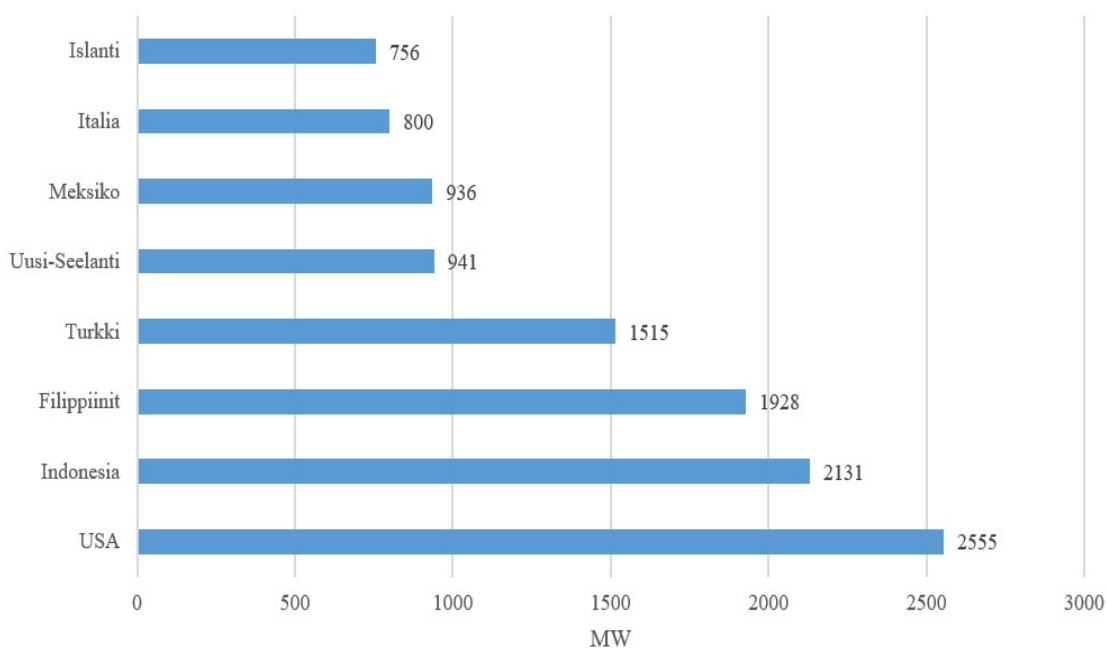


Kuva 8: Mannerlaatat maailmankartalla. Euraasian, Australian, Tyynenmeren, Antarktiksien, Nazcan, Etelä- ja Pohjois-Amerikan ja Afrikan laatat ovat suurimmat mannerlaatat. (Wikimedia commons/USGS, 2017.)

Kuvassa 8 esitelty mannerlaattojen liitoskohtien sijoittuminen maapallolla selittää geotermisen energian käytön alueellista riippuvuutta. Matalammille lämpötiloille soveltuvia käyttötapoja kuten lämmöntuotantoa sekä paranneltuja geotermisiä systeemejä voidaan harjoittaa myös muilla alueilla.

4.1 Geoterminen sähköntuotanto maailmassa

Korkeita geotermisen lähteen lämpötiloja edellyttävä sähkön tuotanto on keskittynyt kuvassa 8 esitettyjen mannerlaattojen liitoskohtien läheisyyteen. (IPCC, 2012.) Seuraavassa kuvaajassa on esitelty maat, joissa on vuoden 2019 loppuun mennessä asennettu eniten geotermistä sähköntuotannon kapasiteettia koko maailmassa.



Kuvaaja 1: Pystyakselilla maiden nimet ja vaakakselilla asennettu kapasiteetti [MW] vuoden 2019 loppuun mennessä. (Lukujen lähde IRENA, 2020.)

Kuvaajasta 1 nähdään, että selvästi suurimmat asennetut kapasiteetit maailmassa ovat tällä hetkellä Yhdysvalloissa, Indonesiassa, Filippiineillä ja Turkissa. Kolme ensin mainittua maata myös tuottavat eniten sähköä geotermisesti. Vuonna 2018 Yhdysvalloissa tuotettiin geotermisesti 18 773 GWh, Indonesiassa 13 296 GWh ja Filippiineillä 10 435 GWh sähköä. Näistä kolmesta suurin kapasiteetin kasvu viime vuosina on tapahtunut Indonesiassa. Yhdysvalloissa ja Filippiineillä kapasiteetin kasvu on tilastojen (IRENA, 2020) mukaan hyvin maltillista viime vuosina. Maltillinen kasvu voi johtua siitä, että korkea lämpötilan hydrotermisiä kohteita on olemassa vain rajoitettu määrä ja EGS-teknologiat ovat vielä suurelta osin kehitysvaiheessa

Paranneltuja geotermisiä systeemejä hyödyntävien laitosten määrä tulee luultavasti tulevaisuudessa lisääntymään, mikä nostaisi geotermisen sähköntuotannon kapasiteettia koko maailmassa. Erityisesti Australiassa, Yhdysvalloissa, Sveitsissä, Kiinassa ja Intiassa on käynnissä EGS-projekteja. Esimerkiksi Sveitsissä on tavoitteena 2,5 GW kapasiteetti tulevaisuudessa. Tämä kattaisi kolmasosan Sveitsin sähköntarpeesta. Myös Australiassa on tavoitteena noin 5,5 GW kapasiteetti EGS-laitoksille. (Aswathanarayana et. al, 2010). Australiassa sijaitsee maailman ensimmäinen EGS-laitos, joka tuottaa sähköä suuremmalla mittakaavalla. (Olasolo et. al, 2016).

4.1.1 Yhdysvalloissa on suuri geotermisen energian kapasiteetti

Yhdysvalloissa geotermistä energiaa on hyödynnetty kaupallisessa mittakaavassa vuodesta 1960 lähtien. Ensimmäinen geoterminen voimalaitos Yhdysvalloissa oli The Geysers Kalifornian osavaltiossa. (Jelacic ja Renner, 2008.) Nykyisin Yhdysvalloissa on suurin geotermisen sähköntuotannon kapasiteetti koko maailmassa (2555 MW). Yhdysvallat sijaitsee maantieteellisesti geotermisen energian kannalta lupaavalla alueella kuvan 8 mukaan. Etenkin läntisten osavaltioiden kuten Nevadan, Kalifornian, Utahin ja Wyomingin alueilla on yli 100°C hydrotermisiä kohteita, jotka soveltuvat sähköntuotantoon. Lisäksi lämmöntuotantoon soveltuvia alle 100°C kohteita on arvioitu sijaitsevan läntisissä osavaltioissa ja rannikkoalueilla. (Hodge, 2010.) Yhdysvalloissa on käynnissä useita geotermisen energian potentiaalın kartoitusprojekteja sekä erilaisia kehitysprojekteja. Yhdysvalloissa on arvioitu jo kartoitettujen resurssien potentiaalın olevan noin 23 000 MW_e. (Jelacic ja Renner, 2008.)

EGS-teknologiat ja siihen sopivien kuivien geotermisten resurssien kartoitus on vasta tutkimusvaiheessa Yhdysvalloissa, mutta arvioitu kapasiteetti on valtava. EGS:n avulla Yhdysvalloissa voitaisiin tutkimusten mukaan tuottaa 100 GW_e sähköä seuraavan 50 vuoden aikana, mikäli EGS saataisiin kaupallisen mittakaavan käyttöön laajemmin. (Jelacic ja Renner, 2008.)

Yhdysvalloissa on siis arvioiden mukaan edelleen suuri geotermisen energian potentiaali niin sähkön- kuin lämmöntuotannon osalta. Maassa on vielä runsaasti hydrotermistä potentiaalia, mutta ehdottomasti suurin osa arvioidusta potentiaalista on kuivia, mahdollisesti EGS-laitosten käyttöön soveltuvia kohteita.

4.1.2 Indonesiassa on maailman suurin geotermisen energian potentiaali

Kuvaajasta 1 nähdään, että Indonesiassa on asennettu maailman toiseksi suurin määrä geotermisen energian kapasiteettia (2131 MW). Kuten edellä mainittiin, siellä myös tuotetaan maailman toiseksi eniten sähköä geotermisesti vuosittain.

Indonesia sijaitsee maantieteellisesti erittäin lupaavalla alueella geotermisen energian hyödyntämisen kannalta. Indonesiassa on arvioitu olevan suurin geotermisen energian potentiaali koko maailmassa, kun puhutaan hydrotermisistä kohteista. Potentiaali on arvioitu olevan noin 40 prosenttia koko maailman arvioidusta potentiaalista eli 28 617 MW. Maassa on arvioitu olevan ainakin 256 aluetta, joilla on potentiaalia geotermisen energiantuotannon kannalta. Näistä suurin osa on korkean lämpötilan (yli 225°C) omaavia kohteita, joita pystyttäisiin lämpötilansa puolesta hyödyntämään sähköntuotannossa.

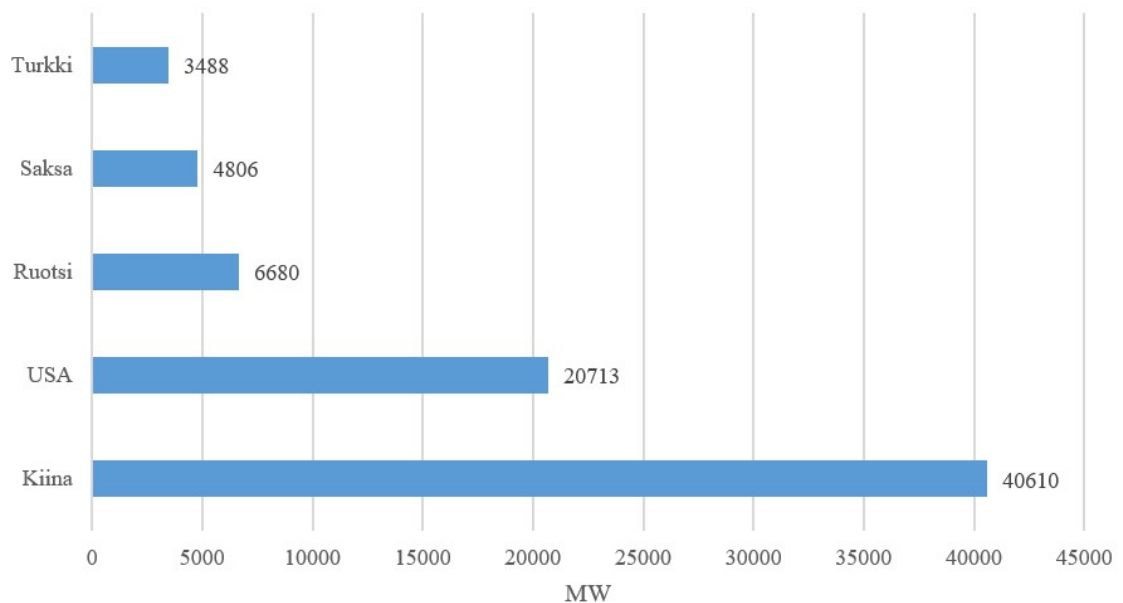
Indonesiassa on vahva halu valjastaa maan potentiaali ja rakentaa lisää geotermisiä voimalaitoksia. Maassa onkin asetettu tavoite nostaa kapasiteetti 9 500 MW:in vuoteen 2025 mennessä. Vaikka tilastojen (IRENA, 2020) mukaan kapasiteetti onkin kasvanut tasaisesti vuosittain, vaatisi näin suuri lisäys merkittäviä investointeja. Indonesiassa uusien voimalaitosten rakentamisen haasteena ovat korkeista rakennuskustannuksista johtuva rahoituksen puute. (Nasruddin et. al, 2016.)

Sähkön saatavuuden parantumisella on kuitenkin merkittävä kansalaisten elintaso ja maan taloutta kohottava vaikutus kehittyvissä maissa (Nasruddin et. al, 2016).

Mikäli vuosittain lisääntyvään sähköntarpeeseen voitaisiin vastata fossiilisten polttoaineiden käytön sijaan geotermisellä energialla, olisi se sekä Indonesian taloudelle että ympäristölle positiivinen asia.

4.2 Suoran lämmöntuotannon tilanne maailmassa

Geoterminen suora lämmöntuotanto ei ole yhtä maantieteellisesti riippuvaista kuin geoterminen sähköntuotanto, sillä se ei vaadi yhtä korkeita geoterminen lähteen lämpötiloja. Maailmassa vuoden 2019 loppuun mennessä asennettu suoran lämmöntuotannon kapasiteetti on arvioitu olevan 107 727 MW. Tämä on 52 prosenttia enemmän kuin vuoden 2015 vastaava asennettu kapasiteetti. Suuri kasvu johtuu pääasiassa geotermistä energiaa hyödyntävien lämpöpumppujen yleistymisestä. Geotermistä lämpöä käytetään tällä hetkellä vuodessa noin 283 580 GWh. (Lund ja Toth, 2020.) Seuraavassa kuvaajassa on esitelty ne maat, joissa on asennettu eniten geotermistä lämmöntuotokapasiteettia vuoden 2019 loppuun mennessä.



Kuvaaja 2: Pystyakselilla maiden nimet ja vaaka-akselilla asennettu geoterminen lämmöntuotannon kapasiteetti [MW] vuoden 2019 loppuun mennessä. (Lukujen lähde: Lund ja Toth, 2020.)

Kuvaajasta 2 nähdään, että selkeästi suurin suoran geoterminen lämmöntuotannon asennettu kapasiteetti maailmassa on tällä hetkellä Kiinassa ja Yhdysvalloissa. Myös muissa maissa geotermistä lämpöä hyödynnetään paljon. Islannin pääkaupungissa Reykjavikissa lähes 90 prosenttia kotitalouksista lämmitetään geoterminen energian avulla (Aswathanarayana et. al, 2010, 45-48). Myös esimerkiksi Italiassa ja Unkarissa geotermistä lämpöä on hyödynnetty kauan ja näissä maissa 80 prosenttia kasvihuoneiden lämmöntarpeesta tuotetaan geoterminen

energian avulla (Golušin et. al, 2013). Geotermisen lämmöntuotannon voi olettaa tulevaisuudessa kasvavan koko maailmassa, sillä se ei ole alueellisesti niin riippuvaista kuin sähköntuotanto.

4.2.1 Suomeen on rakenteilla ensimmäinen geotermisen lämpövoimalaitos

Suomi sijaitsee geotermisen sähköntuotannon kannalta haastavalla alueella. Se on kaukana mannerlaattojen reuna-alueista ja lisäksi Suomen kallioperä on paksua ja kovaa graniittia, johon on nykytekniikalla kallista porata. Kuitenkin geotermiseen lämmöntuotantoon on Suomessa potentiaalia. Espoon Otaniemessä on käynnissä geotermisen lämpövoimalaitoksen rakennusprojekti, jonka tavoitteena on valmistaa Suomeen ensimmäinen teollisen mittaluokan lämpövoimalaitos. Voimalaitos on määrä ottaa käyttöön pilottina vuoden 2020 lokakuussa. Paksun kallioperän vuoksi Otaniemessä on jouduttu poraamaan veden kiertoa varten kaksi reikää 6,4 kilometrin syvyyteen. Nämä reiät ovat maailman syvimmälle geotermisen lämpövoimalaitoksen yhteydessä poratut, ja niiden poraamiseen on käytetty erikoisvalmisteista poraa kovan ja paksun kallioperän vuoksi. Valmistuessaan laitoksen on suunniteltu tuottavan enimmillään 40 MW energiaa. Tämä tarkoittaa noin kymmentä prosenttia Espoon kaupungin lämmöntuotannon tarpeesta. (St1, 2020.)

Tilastollisesti Suomeen on asennettu väkilukuun nähden maailman kolmanneksi eniten suoran lämmöntuotannon kapasiteettia. Suomessa on myös asennettu maailman viidenneksi eniten geotermisten lämpöpumppujen kapasiteettia (2300 MW). (Lund ja Toth, 2020.) Suomessa on havaittavissa kasvavaa kiinnostusta geotermisiin lämpöpumppuihin, sillä niiden myynti on kasvanut koko 2000-luvun ajan. Yli puolet uusista taloista hyödyntää lämmitykseen ja viilennykseen geotermisiä lämpöpumppuja ja myös suurten rakennusten kuten toimisto- ja koulurakennusten osalta käyttö on lisääntynyt. Tavoitteena on, että geotermisillä lämpöpumpuilla pystytään kattamaan kymmenen prosenttia koko maan asuinrakennusten lämmitykseen tarvittavasta energiasta vuonna 2020. (Kallio, 2019)

Geotermisen lämmityksen ja erityisesti geotermisten lämpöpumppujen osalta tulevaisuus Suomessa näyttää positiiviselta. Geotermisen energian käyttö tulee todennäköisesti kasvanemaan osana uusiutuvien energiamuotojen palettia Suomessa.

5 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää eri maiden ja teknologioiden tilannetta geotermisen energiantuotannon kannalta nykyhetkessä ja tulevaisuudessa. Huomattiin, että ihminen on hyödyntänyt geotermistä energiaa jo kauan ja nykyisin sitä hyödynnetään sähkön- ja lämmöntuotantoon maailmanlaajuisesti. Geoterminen energia osoittautui muihin uusiutuviin energiamuotoihin verrattuna luotettavaksi vaihtoehdoksi, jonka tuotanto ei riipu esimerkiksi tuuli- tai aurinkovoiman tavoin säästä tai vuorokaudenajasta. Geoterminen energia voisinkin tulevaisuudessa olla luotettava ja ympäristöystävällinen peruskuorman ylläpitäjä fossiilisten polttoaineiden käytön sijaan. Geotermisen energiantuotannon käytönaikaiset kustannukset todettiin kilpailukykyisiksi, mutta poraus- ja pääomakustannukset ovat edelleen korkeita. Teknologian kehittyessä porauskustannusten voidaan kuitenkin olettaa alenevan ja käytönaikaisten kustannusten edullistuvan entisestään. Kustannusten aleneminen mahdollisesti lisäisi geotermisen energian suosiota.

Geotermisen sähköntuotannon osalta selvitettiin kolme yleisintä voimalaitostyyppiä: kuivahöyry-, flash-höyry-, ja binäärisyklinen voimalaitos. Näistä tällä hetkellä yleisin on flash-höyryvoimalaitos. Tulevaisuudessa kuivahöyrylaitosten rakentaminen tulee keskittymään mannerlaattojen liitoskohtien läheisyyteen sijoittuviin maihin korkean lämpötilavaatimuksen vuoksi. Flash-höyry- ja binäärisyklisillä voimalaitoksilla voi olla esimerkiksi poraustekniikoiden kehittyessä potentiaalia muuallakin kuin mannerlaattojen liitoskohtien läheisyydessä. Lisäksi esiteltiin tulevaisuuden kannalta lupaava EGS-teknologia. Lämmöntuotannon osalta esiteltiin suora lämmöntuotanto ja sen toimintaperiaate sekä geoterminen lämpöpumppu.

Eri maiden tilanteiden osalta huomattiin, että suurin kapasiteetti sähköntuotannossa on asennettuna Yhdysvalloissa, Indonesiassa ja Filippiineillä ja lämmöntuotannon osalta Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Ruotsissa. Todettiin, että geoterminen sähköntuotanto on lupaava mahdollisuus erityisesti kehittyville maille, joissa potentiaali on suurta. Näitä maita ovat esimerkiksi Indonesia ja Filippiinit. Mikäli kustannuksia saataisiin tulevaisuudessa alennettua, voitaisiin maiden potentiaali valjastaa käyttöön. Geoterminen energia voidaan nähdä kehittyville maille tulevaisuuden ratkaisuna sekä taloudellisiin että elintasoon ja ympäristöön liittyviin haasteisiin. Lisäksi mikäli EGS-teknologiat saadaan laajemmin kaupalliseen käyttöön,

geoterminen sähköntuotanto voisi tulla kannattavaksi maailmanlaajuisesti sijainnista riippumatta.

Geoterminen lämmön hyödyntäminen erityisesti lämpöpumppujen osalta on ollut kasvussa koko 2000-luvun ajan ja nousujohteinen tulevaisuus on odotettavissa. Erityisesti pohjoisissa, ilmasto-oloiltaan kylmemmissä maissa geoterminen lämmön rooli voi olla tulevaisuudessa suuri. Ilmastoystävällisyys ja edullisuus houkuttelevat niin pienrakentajia kuin suurempia rakennusprojekteja valitsemaan geoterminen lämpöpumpun. Ilmastonmuutos saattaa vähentää lämmityksentarvetta pohjoisessa, mutta toisaalta geotermisiä lämpöpumppuja voidaan käyttää myös viilennykseen. Ilmaston lämpenemisen edetessä voidaan olettaa, että tarve rakennusten viilennykseen kasvaa tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Anderson, Austin; Rezaie Behnaz. 2019. Applied Energy - Geothermal technology: Trends and potential role in a sustainable future. Elsevier. s. 18-34. [Viitattu 13.7.2020] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.102>

Aswathanarayana, U.; Harikrishnan, T.; Thayyib Sahini, K.M. 2010. Green Energy Technology, Economics and Policy. London, UK: Taylor & Francis Group. ISBN: 987-0-415-87628-5.

DiPippo, Ronald. 2016. Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact. 4. painos. Elsevier. [Viitattu 20.7.2020] Saatavissa: <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpGPPAC15>

EIA – US Energy Information Association. 2019. Geothermal explained. [Viitattu 13.7.2020] Saatavissa: <https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/>

Golušin, Mirjana; Popov, Stevan; Dodić, Siniša. 2013. Sustainable Energy Management. Elsevier. ISBN: 978-0-12-415978-5.

Haapala Ilmari. 2012. From the Earth's Core to Outer Space. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH. [Viitattu 13.7.2020] Saatavissa: <https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1007/978-3-642-25550-2>

Hinrichs, Roger A.; Kleinbach, Merlin. 2013. Energy: Its Use and the Environment. 5. painos, International Edition. Brooks/Cole, Cengage Learning. ISBN: 978-1-133-10902-0.

IPCC. 2012. Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Intergovernmental Panel on Climate Change. [Viitattu 20.7.2020] PDF Saatavissa: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SRREN_Full_Report-1.pdf

IRENA. 2020. Renewable Energy Statistics 2020. Abu Dhabi: The International Renewable Energy Agency. [Viitattu 20.7.2020] PDF saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2020.pdf

Jauhiainen, Tapani; Vuorinen, Heikki S.; Heinonen-Guzejev, Marja. 2007. Ympäristömelun vaikutukset. Ympäristöministeriö. [Viitattu 13.7.2020] PDF Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38400/SY_3_2007_Ymparistomelun_vaikutukset.pdf?sequence=1&isAllowed=y%20TAI%20http://hdl.handle.net/10138/38400

Jelacic, Allan J.; Renner, J.L. 2008. A Perspective on the Future of Geothermal Energy in the United States. IEEE. [Viitattu 8.10.2020] Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4596951>

Kallio, Jarmo. 2019. Geothermal Energy Use, Country Update for Finland. European Geothermal Congress. [Viitattu 9.9.2020] PDF saatavissa: <http://europeangeothermalcongress.eu/wp-content/uploads/2019/07/CUR-10-Finland.pdf>

Kristmannsdóttir, Hrefna; Ármannsson, Halldór. 2003. Environmental aspects of geothermal energy utilization. Elsevier. [Viitattu 13.7.2020] Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(03)00052-X)

Lund, John W.; Toth, Aniko N. 2020. Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review. Proceedings World Geothermal Congress 2020. [Viitattu 9.9.2020] PDF Saatavissa: <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf>

Manzella, A. 2015. Geothermal energy. [Viitattu 13.7.2020] Saatavissa: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159804004>

Moya, Diego; Aldás, Clay; Kaparaju, Prasad. 2018. Geothermal energy: Power plant technology and direct heat applications. Elsevier. [Viitattu 10.9.2020] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.047>

Nasruddin; Alhamid, M. Idrus; Daud, Yunus; Surachman, Arief; Sugiyono, Agus; Aditya, H.B.; Mahlia, T.M.I. 2016. Potential of geothermal energy for electricity in Indonesia: A review. Elsevier. [Viitattu 7.9.2020] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.032>

Ngô, Christian; Natowitz, Joseph B. 2016. Our Energy Future: Resources, Alternatives and the Environment. John Wiley & Sons, Inc. [Viitattu 20.7.2020] Saatavissa: https://books.google.fi/books?id=nxqACgAAQBAJ&printsec=copy-right&hl=fi&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false

O'Keefe, Phil; O'Brien, Geoff; Pearsall, Nicola. 2010. The Future of Energy Use. 2. painos. Earthscan. ISBN: 978-1-84407-505-8.

Olasolo, P; Juarez, M.C.; Morales, M.P.; D'Amico, Sebastiano; Liarte, I.A. 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review. [Viitattu 8.9.2020] Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.031>

St1. 2020. [Verkkosivu] [Viitattu 8.9.2020] Saatavissa: <https://www.st1.fi/geolampo>

Uyar, Tanay Sidki. 2017. Towards 100% Renewable Energy. Springer. [Viitattu 1.9.2020] PDF Saatavissa: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-45659-1.pdf>

Wikimedia commons, 2009. Diagram of EGS with numeric labels. [Viitattu 8.10.2020] Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EGS_diagram.svg

Wikimedia commons. 2008. Heat and Cold Storage With Heat Pump. [Viitattu 10.9.2020] Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HeatAndColdStorageWithHeatPump.jpg>

Wikimedia commons. 2013. Earth cutaway schematic. [Viitattu 10.9.2020] Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth_cutaway_schematic-en.svg

Wikimedia commons/USGS. 2017. Suomennos maapallon mannerlaatoista ja niiden liikesuunnista. [Viitattu 10.9.2020] Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plates_tect2_fi.svg