

Heta Norblad

KAUKOLÄMMÖN KEHITYSMÄHDOLLISUUDET SUOMESSA

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Kandidaatintyö
Seppo Syrjälä
03/2020

TIIVISTELMÄ

Heta Norblad: Kaukolämmön kehitysmahdollisuudet Suomessa (Future prospects for district heating in Finland)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Ympäristö- ja energiatekniikka
Maaliskuu 2020

Kaukolämpö on Suomessa monien kaupunkien ja taajamien pääasiallinen lämmitysmuoto. Kaukolämmön tuotanto on pitkään pohjautunut CHP-laitoksiin ja fossiilisia polttoaineita käyttäviin lämpölaitoksiin, mutta yhteiskunnan siirtyessä kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää, pitää myös lämmöntuotannon uudistua. Tässä kandidaatintyössä arvioitiin erilaisten lämmöntuotantoon liittyvien uusien tekniikoiden soveltuvuutta Suomessa ja esiteltiin käynnissä olevia hankkeita ja pilotointiprojekteja, joissa kyseisiä tekniikoita hyödynnetään.

Suomi on maailmanlaajuisesti kaukolämmön tuotannon ja kulutuksen kärkimaita. Keskitetysti ja tehokkaasti tuotettua lämpöä tarvitaan varsinkin talvisin, sillä lämmön tarve voi tuolloin olla jopa viisinkertainen kesään verrattuna. Kaukolämmön jakeluverkko on varsinkin isoissa kaupungeissa kattava ja sen pituus kasvaa joka vuosi, joten sen hyödyntäminen myös uusien lämmöntuotantotapojen yhteydessä on järkevää.

Tulevaisuudessa merkittävässä osassa lämmöntuotannossa tulevat olemaan lämpöpumput sekä erilaiset hukkalämmön lähteet. Hukkalämpöä syntyy jatkuvasti teollisuuskohteissa, isoissa kiinteistöissä ja datakeskuksissa, ja sen talteenotto lisäisi kokonaisvaltaista energiatehokkuutta. Näiden kohteiden lämpövirrat ovat usein kuitenkin lämpötilaltaan liian alhaisia, joten niiden hyödyntämiseen kaukolämmön tuotannossa tarvitaan avuksi lämpöpumppuja. Uusiutuvan ja vaihtelevan sähköntuotannon lisääntyessä voisi ylijäämäenergiaa käyttää lämpöpumppujen ajamiseen, mikä lisäisi lämpöpumppujen käytön taloudellista kannattavuutta ja vähentäisi lämmöntuotannosta aiheutuvia päästöjä. Lämpövaraston yhdistäminen lämpöpumppuun toisi järjestelmään joustavuutta ja vähentäisi kulutuspiikkien aikaisia kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä, sillä lämpövarastosta purettuna energialla voitaisiin korvata öljy- ja kaasukäyttöisillä lämpölaitoksilla tuotettu lämpö.

Pieni modulaarinen ydinreaktori eli SMR (Small Modular Reactor) on alle 300 MW:n ydinreaktori, joka voidaan rakentaa nopeasti ja joustavasti moduuleista, sekä sijoittaa tavallista ydinvoimalaa lähemmäs asutuskeskuksia. Sen avulla kaukolämpöä voitaisiin tuottaa ilman hiilidioksidipäästöjä. Suomessa on jo meneillään oman, kaukolämmön tuotantoon käytettävän, reaktorityypin kehittäminen, ja sen käyttöönotolla voisi olla positiivisia vaikutuksia monen kunnan ja kaupungin lämmöntuotannon päästöihin. SMR:n mitoittaminen alueen lämmöntarpeeseen on moduuleiden ansiosta helppoa ja sen kapasiteettia voi tarpeen vaatiessa kasvattaa.

Geotermisen lämmön hyödyntäminen kaukolämmön tuotantoon Suomessa on vaikeaa, sillä maaperän heikot lämpöominaisuudet ja korkeat porauskustannukset asettavat haasteita taloudellisesti kannattavan lämpölaitoksen rakentamiselle. Lämmöntuotantoon tarvittavien lämpötilojen saavuttamiseksi lämpökaivon reiän tulee ylittää jopa 8 km:n syvyyteen. Monet pilottihankkeet geotermisen lämmön osalta ovat vasta alkutekijöissään eikä sen merkityksestä tulevaisuuden lämmöntuotannossa voi vielä sanoa varmuudella mitään.

Suomen päätös kieltää kivihiilen energiakäyttö vuodesta 2029 eteenpäin on kannustanut monia energiayhtiöitä pilotoimaan uusia hankkeita lämmöntuotannossa. Kansalliset ja kunnallisella tasolla tehdyt päästötavoitteet koskettavat kaukolämpöyhtiöitä ja ohjaavat niitä uusien teknologioiden pariin. Verotuksella on lisäksi merkittävä rooli esimerkiksi lämpöpumppujen taloudellisen kannattavuuden tarkastelussa. Tulevaisuudessa lämpöpumppujen käyttämä sähkö tulisikin luokitella halvempaan sähköveroluokkaan I ja näin taloudellisesti kannustaa niiden laajempaan käyttöön.

Avainsanat: kaukolämpö, lämpöpumput, hukkalämpö, SMR

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. KAUKOLÄMPÖTEKNIikka	2
2.1 Lämmön tuotanto	2
2.2 Lämmön siirto	3
2.3 Lämmön kulutus.....	4
3. TULEVAISUUDEN TEKNIKOITA.....	7
3.1 Lämpöpumput.....	7
3.2 Hukkalämpö.....	10
3.3 Lämpövarastot	12
3.4 Pienet modulaariset reaktorit.....	13
3.5 Geoterminen lämpö.....	15
4. YHTEISKUNNALLISET PÄÄTÖKSET	19
4.1 Kivihiilen käyttökielto ja energiatuet.....	19
4.2 Verotus	20
5. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET	23

1. JOHDANTO

Kaukolämpö on olennainen osa Suomen energiateollisuutta. Kaupungit kasvavat ja asuminen tiivistyy, joten tehokkaille lämmitystavoille on tarvetta. [1] Kaukolämmön tuotanto ja sen päästöt sekä tehokkuus ovat tärkeässä asemassa mietittäessä ratkaisuja ilmastomuutokseen. Toistaiseksi kaukolämpö tuotetaan suurimmaksi osaksi polttamalla jotakin polttoainetta ja aiheuttamalla näin sivutuotteena päästöjä. Lämmityssektorilla on siis vielä paljon tehtävää päästöjen leikkaamisessa ja kestäväen järjestelmän rakentamisessa. [2] Tulevaisuuden kannalta on tärkeää siirtyä kohti hiilineutraalia lämmöntuotantoa erityisesti Suomen kaltaisessa paikassa, jossa ilmaston vuoksi lämmitykselle on tarvetta huomattavan osan vuodesta.

Energiajärjestelmän murroksen myötä myös lämmön tuotanto on hajautumassa ja siirtymässä pienempien lämpövirtojen ja -lähteiden käyttöön. Olemassa oleva jakeluverkosto on kuitenkin kattava ja sen maksimaalinen käyttö hyödyttäisi kaikkia osapuolia. Kaukolämpöalan tulee kyetä uudistumaan ja tarjoamaan asiakkaille palveluita, jotka kannustavat kaukolämpöverkon tehokkaaseen käyttöön. [3]

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella nykyistä kaukolämpökenttää sekä tehdä kirjallisuusselvitys realistisista tulevaisuuden tekniikoista, joita voidaan käyttää lämmöntuotantoon Suomessa. Työ on rajattu tekniikoiden läpikäyntiin ja Suomessa käynnissä olevien projektien esittelyyn. Tärkeänä kriteerinä erilaisten teknologioiden tarkastelussa on niiden myötävaikuttaminen ilmastotavoitteiden saavuttamisessa sekä integroituvuus energiajärjestelmään, jossa sähkön- ja lämmöntuotanto on yhdistetty joustavasti toisiinsa. Myös lämmöntuotannon taloudellinen kannattavuus esitellyillä tekniikoilla on otettu työssä huomioon.

Luvussa 2 käsitellään nykyistä Suomessa käytössä olevaa kaukolämpötekniikkaa lämmön tuotosta sen siirtoon sekä tarkastellaan, miten lämpöä Suomessa kulutetaan. Luku 3 keskittyy tulevaisuudessa mahdollisesti käytössä oleviin tekniikoihin kuten geotermisen lämmön hyödyntämiseen ja pieniin modulaarisiin ydinvoimaloihin sekä joidenkin nykyisten tekniikoiden uusiin sovelluksiin tai parannuksiin. Luku 4 tarkastelee yhteiskunnallisia päätöksiä ja suuntaa, johon kyseiset päätökset ovat viemässä Suomen lämmöntuotantoa. Lopussa on yhteenveto, jossa pohditaan vielä, mitkä esitellyistä vaihtoehdoista ovat todennäköisimpiä tulevaisuuden kaukolämmityssektorilla.

2. KAUKOLÄMPÖTEKNIikka

Kaukolämmöllä tarkoitetaan rakennusten ja veden lämmittämiseen tarvittavan lämmön keskitettyä tuotantoa, sekä sen jakelua verkon välityksellä asiakkaille [1]. Maailmanlaajuisesti Suomi on kaukolämmön tuotannon ja kulutuksen kärkimaita, kun tarkastellaan lämmityksen markkinaosuuksia [4]. Vuonna 2018 neljännes Suomen energian loppukäytöstä kului rakennusten lämmitykseen, kun esimerkiksi liikenteen osuus loppukäytöstä oli 16% [5]. Tehokkaiden ja vähäpäästöisten lämmöntuotantotapojen kehittämällä on siis merkitystä kokonaisvaltaisessa päästöjen vähentämisessä.

2.1 Lämmön tuotanto

Lämpövoimalaitos tuottaa lämpöä, joka muutetaan generaattorissa sähköksi. Tämä tapahtuu tyypillisesti polttamalla polttoainetta kattilassa ja käyttämällä saatu energia veden höyrystämiseen. Höyryä paisutetaan generaattoriin yhdistetyssä turbiinissa, jolloin saadaan muutettua höyryn lämpöenergia turbiinin pyörimisenergiaksi ja tämä edelleen generaattorilla sähköksi. Turbiinin jälkeinen matalapaineinen höyry tulee vielä lauhduttaa takaisin vedeksi, jotta se voidaan palauttaa kierto-prosessissa kattilaan. [6] Kun lauhdutuksessa saatava lämpö käytetään hyödyksi lämmönvaihtimien avulla tai johtamalla se teollisuusprosessiin, on kyseessä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos eli vastapainevoimalaitos (CHP, Combined Heat and Power) [7]. Suomessa kaukolämmön tuotannosta suurin osa toteutetaan vastapainevoimalaitoksissa [8]. Yhteistuotantolaitoksella on erillistuotantoa korkeampi hyötysuhde, sillä tavallisesti hukkaan menevä lauhdutuslämpö saadaan talteen [7]. Yhteistuotanto siis lisää energiatehokkuutta ja vähentää päästöjä erillistuotantoon verrattuna. Tämä edistää kestäväää ja ympäristöystävällistä energiantuotantoa. [1]

Kaukolämpöä tuotetaan myös pelkkään lämpöön keskittyneissä polttolaitoksissa eli lämpölaitoksissa. Kyseisten laitosten tehtävänä on ainoastaan lämmön siirtäminen veteen tai höyryyn. Suurin osa käytetyistä kattiloista on kuumavesikattiloita mutta joissain pääasiassa teollisuuden käytössä olevissa lämpölaitoksissa saatetaan käyttää höyrykattiloita. Lämpölaitokset toimivat useimmiten varareservinä takaamassa lämmön riittävyyden voimalaitosten seisokkien tai huoltotöiden aikana sekä kovilla pakkasilla huippukulutuksen kattamiseksi. Lisäksi lämpölaitoksia voidaan käyttää pienten kaukolämmitysalueiden lämmön ympärivuotiseen tuotantoon. [1]

Lämmöntuotannon pohjakuorma katetaan yleensä CHP-laitoksilla ja kiinteän polttoaineen kattiloilla. Verkon tehoa ei kokonaan mitoiteta katettavaksi pohjakuormalaitoksilla, sillä kyseisiin laitoksiin investoiminen on kallista ja laitoksen koko vaikuttaa suoraan hankintahintaan. Lisäksi osakuormalla ajaminen huonontaa ison laitoksen hyötysuhdetta. Pohjakuormalaitoksien rinnalle rakennetaan pienempiä laitoksia, jotka voidaan nopeasti käynnistää lämmön tarpeen kasvaessa huippuunsa. Huipputehon ja varatehon kattavina laitoksina toimivat yleensä öljykattilat sekä maakaasua käyttävät lämpölaitokset. Laskennallisena nimellistehona peruslaitokselle voi pitää 40-60% verkon mitoitustehosta. Jos siis alueen suurin vaatima lämmitysteho on 200 MW, voidaan peruskuormalaitoksen maksimitehoksi mitoitaa 80-120 MW. Koska tämän tehon yläpuolelle sijoittuvat huippukulutukset ovat aikakestoltaan lyhyempiä, saadaan peruskuormalaitoksella tuotettua kokonaisenergiasta noin 80-90%. [1]

Kaukolämmön kokonaistuotanto vuonna 2018 oli 37,1 TWh, josta 33,7 TWh tuotettiin polttoaineilla ja loput 3,4 TWh tuotettiin lämmön talteenotolla sekä lämpöpumpuilla. Käytetyistä polttoaineista isoimmat osuudet olivat kivihieillä (19,3%), metsäpolttoaineella (18,8%), turpeella (15,4%) sekä maakaasulla (12,5%). [8] Iso kivihieiden käyttäjä Suomessa on Helsingin energiantuotannosta vastaava Helen Oy, jonka kaukolämmöstä 53% tuotetaan kivihieillä. Tämä johtuu pitkälti Helsingin seudun suuresta lämmitystarpeesta, johon ei nykyisellä järjestelmällä pystytä tehokkaasti vastaamaan ilman kivihieitä. [9] Vertailun vuoksi esimerkiksi Tampereen alueen energiantuotannosta vastaava Tampereen sähkölaitos ei käytä lämmöntuotannossaan lainkaan kivihieitä [10]. Kaukolämmön tuotannon ominaispäästöt vuonna 2018 olivat 147,1 gCO₂/kWh. Päästöjen kehityksen trendi on ollut 90-luvulta asti laskeva [8]. Keskimääräinen Suomessa kulutetun sähkön ominaispäästö taas oli vuonna 2019 91 gCO₂/kWh [11].

2.2 Lämmön siirto

Kaukolämpö on nimestään huolimatta isossa mittakaavassa melko alueellista. Sen tuotanto ja käyttö on keskittynyt tiheästi asutuille alueille, sillä verkossa tapahtuvien lämpö- ja painehäviöiden vuoksi siirron kannattavuus laskee siirtoetäisyyden kasvaessa. [1] Lämpö- ja painehäviöiden vuoksi myös joitain potentiaalisia lämmönlähteitä jää hyödyntämättä, kun liian kaukaisten teollisuusalueiden hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöverkossa ei ole nykyisellään taloudellisesti järkevää.

Kaukolämpö siirretään asiakkaille useimmiten putkissa kiertävän veden avulla. Joissain tapauksissa saatetaan käyttää siirtovälineenä höyryä, mutta Suomessa se on harvinaista ja liittyy lähinnä teollisuuden lämmitystarpeisiin ja niissä käytettäviin höyrykattiloihin. Suomessa putkistoissa kulkeva vesi on korkeintaan 120 °C, mutta esimerkiksi Keski-Euroopassa saatetaan käyttää jopa 180 °C:n lämpötilaa, joka mahdollistaa pidemmät siirtoetäisyydet voimalaitoksilta kohteisiin. [1] Mitä suurempi on meno- ja paluulämpötilan ero, sitä suurempi on lämpötehon siirtokapasiteetti. Menoveden lämpötilaa säädettyä tulee kuitenkin ottaa huomioon myös suuremmat lämpöhäviöt korkeissa lämpötiloissa sekä verkon rasittuminen. [12] Jos lämpöä ei siirry tarpeeksi asiakkaan laitteistossa ja laitokselle palaavan veden lämpötila on liian korkea, huononee laitoksen hyötysuhde [13].

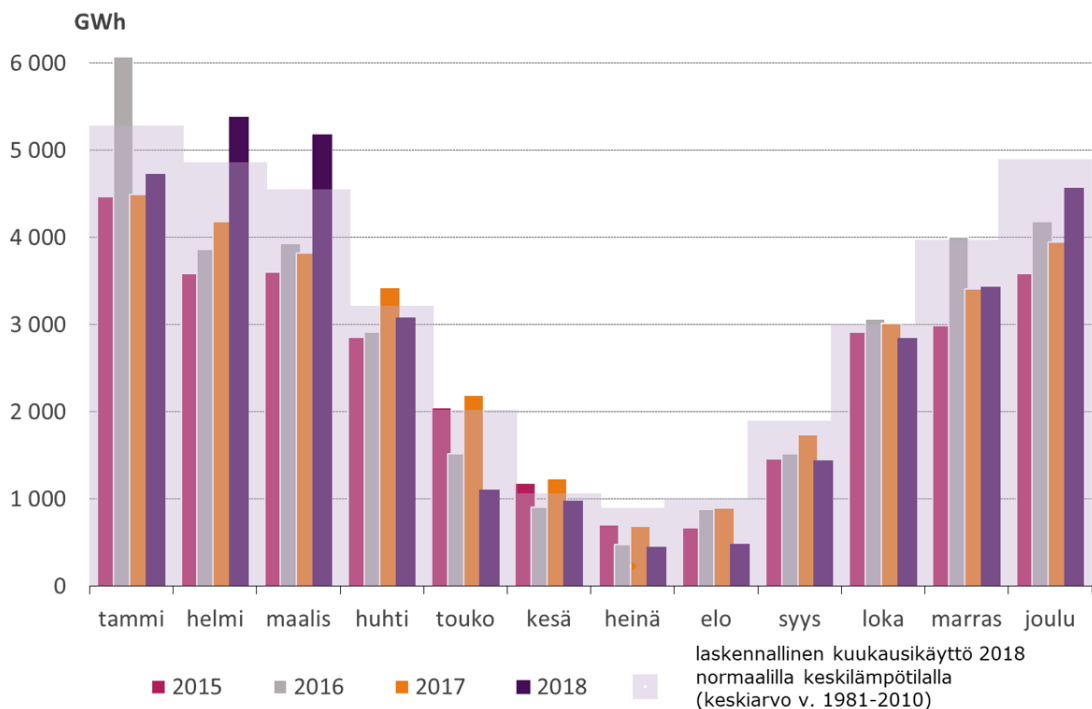
Kaukolämmön siirtoon laitokselta asiakkaalle käytetään Suomessa kaksiputkijärjestelmää, jossa menoputki kuljettaa lämpimän veden asiakkaalle ja paluuputki palauttaa viilenneen veden takaisin laitokselle. Verkossa kiertävästä vedestä on poistettu korrosoiva happi sekä mekaaniset epäpuhtaudet, jotka saattaisivat kerrostua putkistoon. Verkossa ylläpidetään pumppujen avulla tarpeeksi korkeaa keskipainetta veden höyrytymisen estämiseksi. Painetta korottavia pumppuja on tuotantolaitoksella sekä tarvittaessa verkon eri vaiheissa, jotta kaukaisimmillakin asiakkailla on riittävä paine-ero laitteissaan säätöä varten. Jos asiakas on kytketty verkkoon epäsuorasti, välitetään lämpö kiertovedestä lämmönsiirtimissä rakennuksen sisäiseen nestekiertooppiiriin, joka on täysin eristetty kaukolämpöverkosta. Suomessa on yleisimmin käytössä epäsuora kytkentä. Esimerkiksi Tanskassa ja Saksassa tyypillisesti käytettävässä suorassa kytkennässä kaukolämmön kiertovesi luovuttaa lämpönsä suoraan pattereissa ja ilmanlämmittimissä. [1] Vuonna 2018 Suomessa oli kaukolämmön siirtoverkkoa yhteensä 15 140 km [14]. Lämpöhäviöiden keskimääräinen suuruus verkossa siirretyn energian määrästä on yleensä noin 8-9% [1].

2.3 Lämmön kulutus

Lämmön tarpeeseen vaikuttavat lämpimän käyttöveden kulutus, rakennusten sisälämpötilan vaihtelu ja säätila. Edellä mainituista ennustettavissa ovat tilastojen perusteella käyttöveden kulutus ja rakennusten sisälämpötilan vaihtelu. Säätila ja siitä johtuva ulkolämpötilojen vaihtelu on satunnaista, vaikkakin pitkäaikaisvaihtelua on mahdollista karkeasti ennustaa keskilämpötilojen avulla. [1]

Energiakulutuksen vaihtelut ovat usein arvioitavissa asiakastyypin perusteella. Esimerkiksi asuinrakennus käyttää lämpöä tasaisesti viikonpäivästä riippumatta mutta toimistorakennus kuluttaa viikonloppuisin huomattavasti vähemmän energiaa, kun ilmanvaihtolaitteet on kytketty pois päältä. Asuinrakennusten lämmöntarpeen huippukohtat ajoittuvat aamuun ja iltaan, kun lämpimän veden kysyntä on suurimmillaan. [1]

Suurin tarve kaukolämmölle on luontaisesti Suomen ilmastossa talvisin. Riippuen lämpötiloista ja pakkasten kestosta voi lämmön tarve jopa viisinkertaistua talvikuukausina kesäkuukausiin verrattuna, kuten kuvasta 1 nähdään. [15] Vuonna 2018 helmi- ja maaliskuu olivat keskilämpötilaltaan huomattavasti aiempia vuosia kylmempiä ja isoissa kaukolämpökaupungeissa Helsingissä, Tampereella ja Turussa mitattiin jopa 4-6 °C alhaisempia keskilämpötiloja vuosiin 2015-2017 verrattuna. [16] Lämpötilan laskun vaikutus on suoraan nähtävissä kuukausikäytön merkittävän kasvuna [15].



Kuva 1. Kaukolämmön kuukausikäyttö vuosina 2015-2018 [15]

Suurimpia kaukolämpöalueita Suomessa ovat pääkaupunkiseutu, Tampere, Turku sekä Oulu. Suomen isoimmat myyjät kaukolämmön kulutuksessa mitattuna olivat vuonna 2018 Helen Oy, Fortum Power and Heat Oy, Tampereen Sähkölaitos, Turku Energia Oy Ab, Vantaan Energia Oy sekä Oulun Energia Oy. [8] Taulukossa 1 on koottu yhteen suurten yhtiöiden lämmönkulutuksen kehitys vuosina 2014-2018. Taulukossa on huomi-

oitu vain Fortum Power and Heat Oy:n Espoon alueen kulutus, sillä se muodostaa merkittävän osan yhtiön kaukolämmön kulutuksesta ja antaa paremman kuvan pääkaupunkiseudulla kuluvan lämmön huomattavasta määrästä.

Taulukko 1. Suomen suurimmat kaukolämpöyhtiöt kulutuksen mukaan 2014-2018

Myyjäyhtiö	2014 (GWh)	2015 (GWh)	2016 (GWh)	2017 (GWh)	2018 (GWh)
Helen Oy	6 385,20	5 984,60	6 632,80	6 606,20	6 700,20
Fortum Power and Heat Oy Espoo	1 888,80	1 830,20	2 027,00	2 035,20	2 036,50
Tampereen Sähkölaitos	2 011,80	1 911,30	2 107,40	2 070,70	2 113,10
Turku Energia Oy Ab	1 854,00	1 750,80	1 962,30	1 921,90	1 947,80
Vantaan Energia Oy	1 615,00	1 510,30	1 696,00	1 680,60	1 713,00
Oulun Energia Oy	1 381,80	1 319,50	1 454,20	1 481,90	1 487,10

Kuten taulukosta huomataan, pääkaupunkiseudun kaukolämmön kulutus on kaksinkertainen muiden suurten kaupunkien yhteenlaskettuun kulutukseen. Kun tarkastellaan lämmityssektorin päästöjen vähentämistä, on tärkeää kiinnittää huomiota erityisesti Helenin ja Fortumin tekemiin päätöksiin, sillä niiden vaikutus päästöihin on suuri.

3. TULEVAISUUDEN TEKNIKOITA

Kaukolämmön tuotanto elää murrosvaihetta, kun samaan aikaan lämmön tarve vähenee rakennusten energiatehokkuuden parantuessa, mutta kansalliset ilmastotavoitteet asettavat haasteita tuotantokapasiteetin säilymiselle siirryttäessä pois kivihiilen ja maakaasun käytöstä [17]. Lisäksi hajautetun energiantuotannon lisääntyminen vähentänee isoilla laitoksilla tuotetun kaukolämmön yleistä kysyntää tulevilla vuosikymmenellä [18]. Kaukolämpöverkko on kuitenkin varsinkin isoissa kaupungeissa kattava ja sen hyödyntäminen lämmön jakeluun tulevaisuudessakin on järkevää, vaikka tuotantomuodoissa siirryttäisiin hajautetumpaan rakenteeseen. [19]

Tuulivoiman tuotannon lisääntyessä se tulee korvaamaan käyttökustannuksiltaan kalliimpaa lämpövoimaa ja pakottaa mahdollisesti osan CHP-voimalaitosten tuotantokapasiteetista poistumaan markkinoilta [20]. Taloudelliset intressit muiden lämmönlähteiden käyttämiseen kasvavat, kun pohjakuorman kattamisen tarvitsee käyttää CHP-laitoksia kalliimpia tuotantomuotoja.

Suomen suurin kaukolämmön tuottaja Helen on linjannut luopuvansa kivihielestä vuoteen 2029 mennessä ja sulkevansa Hanasaaren yhteistuotantolaitoksen vuoden 2024 loppuun mennessä. Tämä tarkoittaa pääkaupunkiseudun kaukolämpökapasiteetissa 870 MW vajetta, jonka korvaamiseksi täytyy löytää kestäviä ja Helenin hiilineutraaleja tavoitteita tukevia tuotantomuotoja. Osa korvaavasta tuotannosta on tämän hetken suunnitelmissa tarkoitus toteuttaa biomassaa polttavilla lämpölaitoksilla. [21] Myös muut suuret kaukolämpöä hyödyntävät kaupungit ovat vastaavien haasteiden edessä. Tampereen kaupungin pyrkimys saavuttaa hiilineutraali kaupunki vuoteen 2030 mennessä tarkoittaa kaukolämmön tuotannon päästöjen vähentämistä 89 %:lla vuoden 2015 tasosta [22]. Turun kaupunki on asettanut tavoitteen alueen hiilineutraaliudesta vuoteen 2029. Kaukolämmön osalta Turun ilmastotavoitteisiin on kirjattu, että vuonna 2021 uusiutuvan energian osuus tuotannosta on vähintään 65%. [23]. Lisäksi Turun Seudun Energiatuotanto Oy, jonka omistavat Fortum, Turku Energia sekä Raisio, Naantal ja Kaarinan kaupungit, on pyrkimässä korvaamaan Naantal voimalaitoksen kivihiilen käytön muilla ratkaisuilla [24].

3.1 Lämpöpumput

Lämpövoimakone muuttaa lämmön mekaaniseksi työksi hyödyntäen lämmönlähteen ja ympäristön välillä olevaa lämpötilaeroa. Lämmön muuntaminen mekaaniseksi energiaksi

tapahtuu koneen sisällä olevan väliaineen, usein nesteen tai kaasun, tilavuuden muuttoksen kautta. Lämpövoimakone operoi kahden lämpövaraston välillä ja siitä saatava työ ideaalitulanteessa ilman häviöitä riippuu tuodusta ja luovutetusta lämmöstä seuraavan kaavan mukaan:

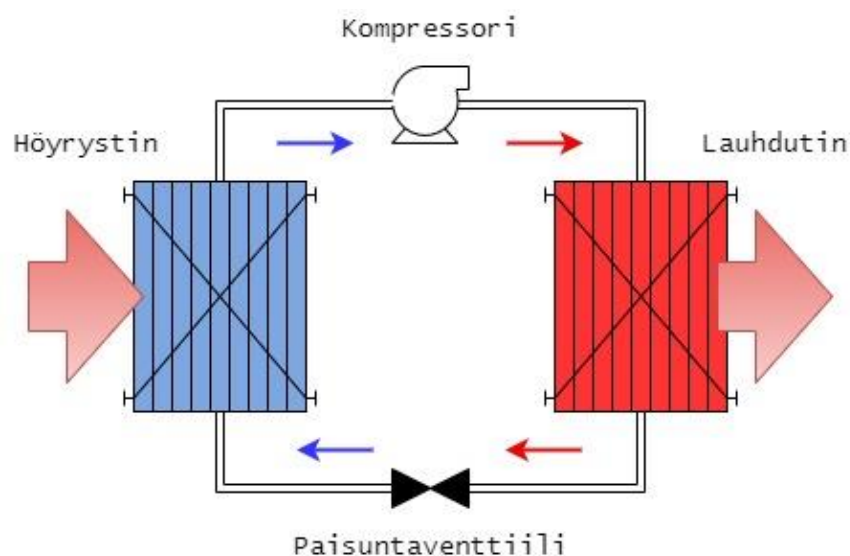
$$W_{max} = Q_H - Q_L, \quad (1)$$

jossa Q_H on korkeasta lämpötilasta tuotu lämpö ja Q_L on matalaan lämpötilaan luovutettu lämpö. Tilanteessa, jossa kaikki kahden lämpövaraston välillä siirtyvä lämpöenergia saataisiin muutettua työksi, puhutaan maksimaalisesta hyötysuhteesta eli Carnot-hyötysuhteesta.

$$\eta_{max} = \frac{W_{max}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{T_H - T_L}{T_H}. \quad (2)$$

Lämpövoimakoneen hyötysuhdetta saadaan kasvatettua, kun lämpövarastojen välinen lämpötilaero on mahdollisimman suuri. [25]

Lämpöpumpun toimintaperiaate on vastakkainen lämpövoimakoneelle. Lämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa matalamman lämpötilan varastosta korkeampaan lämpötilaan tekemällä työtä. Sen toiminta perustuu koneessa kiertävän kylmäaineen faasimuutoksiin. Lämpöpumpun kylmäaine höyrystetään matalapaineen avulla, jolloin se sitoo faasimuutoksessaan lämpöä kylmästä lämpövarastosta. Vastaavasti kompressorin puristuspuolella kylmäaineen paine kasvaa ja sen kiehumispiste nousee, jolloin kaasu nesteytyy ja luovuttaa faasimuutoksen vapauttaman lämpöenergian korkeamman lämpötilan varastoon. Paisuntaventtiin tehtävänä on madaltaa lauhtuneen kylmäaineen painetta ennen uuden kierron alkamista. [26]



Kuva 2. Lämpöpumpun periaatekuva

Mitä kylmempi höyrystimen puoli on, sitä matalammaksi paine pitää saada, jotta kylmäaineen kiehumispiste laskee tarpeeksi. Vastaavasti mitä suurempaan lämpötilaan lämpöenergiaa halutaan viedä, sitä suuremmaksi paine pitää lauhduttimessa nostaa kiehumispisteen nostamiseksi. Kompressorin tekemä työ ja sitä kautta kuluttama sähköenergia siis kasvaa, kun lämpövarastojen välinen lämpötilaero suurenee.

Lämpöpumppujen avulla kaukolämmön tuotantoon voidaan käyttää matalamman lämpötilan lämmönlähteitä, jotka eivät sellaisenaan riittäisi lämmittämään kaukolämpövedettä tarpeeksi korkeaan menolämpötilaan. Näin saadaan otettua esimerkiksi erilaisia hukkalämpövirtoja talteen ja monipuolistettua tuotantoa [27]. Vaikka kaukolämpö tuotetaan yleensä keskitetysti, mahdollistaa lämpöpumppujen hyödyntäminen lämmöntuotannon hajauttamisen esimerkiksi kaupunginosa- tai korttelitasolle. Lyhyemmät siirtoyhteydet vähentävät lämpö- ja painehäviöitä. Lisäksi tiivistyvässä kaupungissa isojen lämpölaitosten ja polttoainevarastojen rakentaminen vaikeutuu, jolloin paikallisesti talteen otettu ja jaettu lämpö estävät lämmöntuotannon siirtymisen kaupungin ulkolaidoille. Häviöiden pieneneminen luonnollisesti alentaa kustannuksia ja vähentää päästöjä.

Lämpöpumppuihin kannattaa investoida silloin, kun niiden avulla pystytään varmistamaan, että alueen lämpökuorma ja lämmöntuotanto ovat yhteensopivia. Ison alkuinvestoinnin vuoksi tulee lämpöpumpun käyttökustannusten olla kohtuullisella tasolla. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että lämpöpumpun talteen ottama lämpö ei saa maksaa tai sen tulee olla edullista. [28]

Hyödynnettäessä lämpöpumppuja kaukolämmön tuotantoon on ensisijaisena mielenkiinnon kohteena tarpeeksi korkeassa lämpötilassa sijaitsevat lämmönlähteet. Suomen viileä ilmasto ja Helsingin edustan matala rannikko rajoittavat esimerkiksi Tukholmassa käytössä olevaa meriveden lämmön hyödyntämistä lämpöpumpuissa [29]. Sen sijaan useista teollisuuden kohteista voisi löytyä riittävän korkeita lämpötiloja, joiden hyödyntäminen olisi niin taloudellisesti kuin termodynamiikan kannalta järkevää.

Helenillä on käytössä vuonna 2006 rakennettu maailman suurin lämpö- ja jäähdytyslaitos. Katri Valan lämpöpumppulaitoksessa on yhteensä viisi lämpöpumppua, jotka tarjoavat 105 MW lämpötehoa Helsingin kaukolämpöverkkoon. Lämmönlähteinä lämpöpumpuille toimivat jätevedenpuhdistamolta poistuva vesi sekä kiinteistöjen jäähdytyksessä poistuva auringon lämpöenergia. [28] Lisäksi Helen on investoinut Katri Valan laitokseen asennettavaan kuudenteen, kesällä 2021 käyttöön otettavaan lämpöpumppuun [30].

Myös Turun Seudun Energiantuotanto Oy:lla on Kakolan jätevedenpuhdistamon yhteyteen rakennettu lämpöpumppulaitos. Kahdella 20 MW:n lämpöpumpulla syötetään Turun kaukolämpöverkkoon noin 85-asteista vettä. [28]

Eräs tapa yhdistää jatkuvasti kasvussa oleva sähkön vaihteleva tuotanto ja lämpösektori voisi olla kaukolämpöverkkoon liitettyjen lämpöpumppujen ajaminen. Sähkön markkinahinnan ollessa alhainen lämpöpumpulla tuotettaisiin lämpöä joko suoraan verkkoon tai vaihtoehtoisesti lämpövarastoon. Riippuen lämmön hinnoittelusta ja lämpövaraston purkamisajankohdasta voi saatava taloudellinen hyöty olla suurempi kuin suoran sähkön myyminen. [28]

Tällä hetkellä lämpöpumppujen käyttämä sähkö luokitellaan sähköveroluokkaan 1, mikä lisää lämpöpumppujen avulla tuotetun lämmön kustannuksia ja tekee siitä vähemmän kilpailukykyisen [31]. Jatkossa kuitenkin muutokset verotuksessa voivat edesauttaa lämpöpumppujen käytön yleistymistä, kun niiden taloudellinen kannattavuus nousee.

3.2 Hukkalämpö

Hukkalämpöä hyödynnetään jo nykyisin käyttämällä esimerkiksi teollisuudesta syntyvää ylijäämälämpöä kaukolämmön tuotantoon. Sen sijaan, että primäärienergiasta käyttämättä jäävä matalan lämpötilan osuus johdettaisiin savukaasuissa tai jäähditys- ja jätevesissä pois, voidaan sitä hyödyntää esimerkiksi lämpöpumppujen avulla kaukolämpönä tai uudelleen kierrättää se teollisuusprosessiin. [32] Vuonna 2018 hukkalämmön osuus kaukolämmön hankinnasta oli 9,1% [8]. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisessä ongelmana on usein teollisuuslaitosten syrjäinen sijainti, jolloin kaukolämpöverkkoon on pitkä matka ja lämmöntarvitsijoita ei ole lähistöllä riittävästi [32].

Tulevaisuudessa kaukolämpöverkkoon liitettäviä hukkalämpöä tuottavia kohteita voivat olla esimerkiksi yritysten jakelukeskukset sekä isot kiinteistöt kuten sairaalat ja kauppakeskukset [32]. Myös suurten kaupunkien teollisuusalueiden yhteydessä syntyvää hukkalämpöä voi olla kannattavaa ottaa talteen. Useimmiten tällaisissa kohteissa lämpövirtojen lämpötilataso on sellaisenaan käytettäväksi liian matala ja niiden hyödyntäminen nykyisessä kaukolämpöverkossa vaatii lämpöpumpun käyttämistä.

Vuonna 2019 teettämässään esiselvityksessä Helen on kartoittanut Porvoon Kilpilahden teollisuusalueella sijaitsevien yritysten hukkalämpöjen hyödyntämistä pääkaupunkiseudun kaukolämpöverkossa. Selvitykseen osallistuivat Helenin lisäksi Neste, polyolefiineja tuottava Borealis Polymers Oy, Fortum sekä Keravan Energia. Arvioiden mukaan alueella syntyvä hukkalämpö on jopa 1000 MW:n luokkaa ja se voisi kattaa noin neljännek-

sen pääkaupunkiseudun kaukolämpöverkon lämmöntarpeesta. Lämmöntarpeen kausittainen vaihtelu rajoittaa jonkin verran koko lämpömäärän täydellistä hyödyntämistä. Toiteutessaan Kilpilahden hankkeen lämmönoimitukset alkaisivat aikaisintaan 2025. [33] Helenin sulkiessa kivihiehellä toimivia voimaloitaan on suurten sekä pienten hukkalämmönlähteiden löytäminen entistä tärkeämpää. Samalla vähennetään tarvetta korvata kiivihiili biopolttoaineita käytävillä lämpölaitoksilla.

Neste ja Turun Seudun Energiantuotanto Oy (TSE) ovat yhteistyössä selvittäneet Naantalissa sijaitsevan öljyjalostamon hukkalämpöjen käyttämistä kaukolämmön tuotannossa. Tämä edistäisi TSE:n tavoitetta kivihiehellä käytön lopettamisesta Naantalissa voimalaitoksella sekä parantaisi Nesteen jalostamon energiatehokkuutta. [34] Samalla Neste saisi korvauksen TSE:n talteen ottamasta lämmöstä ja TSE vähentäisi polttoainekustannuksiaan. Teollisuuden ja energiantuotannon yhteistyön kautta voi siis syntyä molempia hyödyttäviä ratkaisuja, jotka vähentävät syntyviä päästöjä ja lisäävät taloudellista kannattavuutta.

Datakeskusten määrä Suomessa on jatkuvassa kasvussa. Isot teknologiayhtiöt, kuten Google ja Microsoft, ovat perustaneet omia palvelinkeskusiansa eri puolille Suomea ja investoineet niiden kautta satoja miljoonia euroja työpaikkoihin ja talouteen. Suomi on yksi maailman houkuttelevimmista kohteista datakeskusten sijoituksille, sillä vallitsevat ilmasto-olosuhteet ja poliittinen ilmapiiri takaavat vakaan toimintaympäristön datakeskusten ylläpitoon. Pohjoismaiden alhainen sähkön hintataso ja varma saatavuus kannustavat pitkäaikaisten investointien tekoon. [35]

Palvelimet tuottavat toimiessaan lämpöä ja niiden jatkuva jäähdytys vaatii paljon sähköä. Suomen kaltaisessa pohjoisessa maassa voidaan keskusten jäähdytyksessä hyödyntää viileää ulkoilmaa ja näin vähentää kulutettavaa sähköä sekä leikata päästöjen määrää. Kun tiedon määrä ja palvelinkeskusten tarve jatkuvasti kasvaa, on tärkeää, että IT-sektorin päästöihin kiinnitetään huomiota ja niitä pyritään minimoimaan esimerkiksi yhdistämällä palvelinkeskusten jäähdytyksen tarpeen tiettyjen alueiden lämmöntarpeeseen. Hyödyntämällä datakeskusten hukkalämpöä kaukolämmön tuotannossa saadaan aikaan tehokas ja ympäristöystävällinen tapa monipuolistaa lämmöntuotantoa. [36]

Venäläisellä hakukoneyhtiö Yandexilla on Mäntsälässä palvelinkeskus, jonka jäähdytyksen hukkalämmön se myynyt Mäntsälän kunnan omistamalle Nivos Oy:lle. Palvelinkeskus jäähdytetään perinteiseen tapaan ilmalla mutta poistuvasta ilmasta otetaan talteen lämpöenergiaa lämmönvaihtimien avulla sen sijaan, että lämmin ilma ohjattaisiin suoraan ympäristöön. Koska noin 37-asteisesta poistoilmasta ei vielä saada siirrettyä tar-

peeksi lämpöä veteen suoraan kaukolämpöverkkoon syötettäväksi, käytetään lämpötilan kasvattamiseksi yhteensä 24 lämpöpumppua. Lämpöpumpuilla lämmönsiirtimistä tuleva vesi saadaan nostettua 85-87 °C:een ja syötettyä kaukolämmön menoveteen. [28] Aikaisemmin maakaasulla tuotetusta Mäntsälän kaukolämmöstä tuotetaan nykyisellään noin puolet Yandexin palvelinkeskuksen hukkalämmöllä. Kaukolämmön hiilidioksidipäästöjä lämmön kierrättäminen on vähentänyt noin 40%. [37]

3.3 Lämpövarastot

Sähkön ja lämmön kulutusvaihtelut ovat ajallisesti tarkasteltuna erilaiset johtuen esimerkiksi sähkön kulutuksen pienemmästä riippuvuudesta sääolosuhteisiin. Tämä aiheuttaa sen, että CHP-laitoksia ajetaan joko sähkön tai lämmön tarpeen mukaan ja loppuosa tarvittavasta kapasiteetista tuotetaan toisilla tavoilla. [1] CHP-laitoksella tuotettu sähkö ja lämpö ovat kustannuksiltaan halpoja ja laitosten hyötysuhteet ovat korkeita. Lämpövarastoja hyödyntämällä voidaan CHP-laitoksien sähköntuotannon ja lämmöntuotannon riippuvuutta toisistaan vähentää ja nostaa näin laitoksen tuottavuutta. Esimerkiksi tilanteessa, jossa sähkön kysyntä on suurempaa kuin lämmön kysyntä ja sähkön markkinahinta on korkea, voitaisiin CHP-laitosta ajaa sähkön kysynnän mukaan ja ohjata ylijäämälämpö lämpövarastoon. Vaihtoehtoisesti tilanteessa, jossa lämmön kysyntä on hetkellisesti alhaisempi kuin laitoksen sen hetkinen tuotanto, voidaan lämpö jälleen ohjata lämpövarastoon, eikä tuotantoa tarvitse säätää yhtä usein. Varastoidulla lämpöenergialla voidaan vähentää huippukulutuksen aikaisia kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä, kun puretulla lämpöenergialla korvataan esimerkiksi öljy- tai kaasukäyttöisellä lämpölaitoksella yleensä tuotettava lämpö. [38]

Lämpöä voidaan varastoida useilla eri tavoilla. Yleisin käytettävä aine kaukolämpöverkkojen lämpövarastoille on vesi. Kun lämpövaraston lämpötila ei ylitä 100 °C, ei ongelmia synny veden höyrystymisen kanssa. Veden suuren ominaislämpökapasiteetin ansiosta siihen saadaan varastoitua paljon lämpöenergiaa pienellä lämpötila-alueella, mikä helpottaa varaston rakentamista. Myös veden helppo saatavuus ja siirrettävyys puoltavat sen käyttöä varastomateriaalina. [39]

Myös kiinteisiin aineisiin voidaan varastoida lämpöä. Mahdollisia materiaaleja lämpövarastolle ovat kiviaines, tiili ja hiekka. Tamperelainen start up -yritys Polar Night Energy Oy on kehittänyt hiekkaan perustuvaa korkean lämpötilan lämpövarastoa. Hanke on saanut Tampereen kaupungilta pilottitukea ja sen testaus on tarkoitus käynnistää alkuvuodesta 2020 Tampereen Hiedanrannassa. Testipilotissa energianlähteenä toimii 100 m² aurinkopaneeliryhmittymä ja verkosta saatava sähkö. Lämpövarasto toimittaa lämpöä muutamalle lähialueen kerrostalolle. Lopullisena tähtäimenä Polar Night Energylla on

toimittaa lämpövarastoratkaisuja niin pientaloasujille kuin isoille rakennuskomplekseille ja kaukolämpöverkoille. [40]

Lämpövarastot lisäävät joustavuutta kaukolämmön tuotantoon. Yhdistämällä lämpövarastot esimerkiksi uusiutuvaan sähköntuotantoon voidaan samanaikaisesti tasata sekä sähkön- että lämmöntuotantoja. Lämpöpumpun yhdistäminen lämpövarastoon mahdollistaa peruskuormalaitosten käyttöasteen optimoinnin, kun laitosta ei tarvitse ajaa lämmön kulutuksen perusteella. [28]

Lämpövarastojen ongelmana on niiden vaatima tila sekä niissä tapahtuvat lämpöhäviöt, jotka huonontavat kokonaishyötysuhdetta. Tiheässä kaupunkirakenteessa varastot pitää esimerkiksi louhia maan alle, mikä lisää investointikustannuksia. Myös lämpövarastojen varastointiaikaa pidentävä eristäminen lisää alkukustannuksia, vaikka se vähentääkin lämpöhäviöiden määrää. Varastointimateriaaliksi tulee valita tarpeeksi energiatiheä materiaali, jotta tarvittava lämpömäärä saadaan varastoitua mahdollisimman pieneen tilavuuteen ja varaston koko ja rakennuskustannukset eivät kasva liian isoiksi.

3.4 Pienet modulaariset reaktorit

Pieni modulaarinen ydinreaktori eli SMR (Small Modular Reactor) on nimensä mukaisesti teholtaan pieni, alle 300 MW:n, moduuleista rakennettava ydinreaktori. Perinteiset ydinvoimalat ovat kalliita rakentaa ja niiden rakentamisen keskimääräinen kesto on seitsemän vuotta. Tämä on suoraa seurausta siitä, että rakentaminen tapahtuu yhdessä paikassa osa kerrallaan ilman yhtäaikaista tuotantoa. SMR:n ideana on soveltaa muun muassa laivateollisuudesta tuttua kaavaa, jossa projektin osat valmistetaan eri tehtaissa ja tuodaan laitoksen rakennuspaikalle koottavaksi aivan kuin laivan osat kootaan yhteen telakalla. Suomessa ydinvoimalat on suunniteltu vain sähköntuotantoon mutta muualla maailmassa niitä on käytetty myös kaukolämmöntuotannossa ja esimerkiksi meriveden suolanpoistossa. [41]

SMR:n eduiksi kaukolämmön tuotannossa on luettavissa muun muassa sen hiilettömyys. Energian ja varsinkin lämmön tuotannossa on edelleen mukana aivan liian paljon polttamista. Sähköntuotanto on jo mahdollista toteuttaa isossa mittakaavassa hiilineutraalisti aurinko- ja tuulivoiman avulla, mutta lämmöntuotannon suhteen kehitys on vielä kesken. Biopolttoaineet ovat askel oikeaan suuntaan, mutta eivät välttämättä tarpeeksi tehokas toimi, kun kivihiihellä nykyisin tuotettava energia täytyy korvata vaihtoehtoisilla keinoilla. [42].

Suhteellisen pienen kokonsa ansiosta SMR voidaan helpommin sijoittaa lähelle tiiviisti rakennettua kaupunkiympäristöä. Kun siirtomatkat lyhenevät vähennetään myös lämpöhäviöitä ja nostetaan kustannustehokkuutta. Moduuleista koostuva voimala voidaan mitoittaa kulloisenkin alueen tarpeeseen helpommin ja tuotannon koon kasvattaminen tarpeen vaatiessa ei ole ongelma. Vähemmän radioaktiivista polttoainetta sisältävä pieni ydinvoimareaktori on lisäksi onnettomuuden sattuessa turvallisempi kuin moninkertaisesti isommat perinteiset ydinvoimalat. [43]

SMR:ien kehitystyötä on tehty lähinnä Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Venäjällä. Venäjällä on jo toiminnassa kelluva ydinvoimala Akademik Lomonosov, jossa on käytössä kaksi KLT-40S-reaktoria. Yhdysvaltalaisen NuScale Power Inc. -yhtiön NuScale reaktori on lisensointivaiheessa ja sen odotetaan saavan lisenssin vuonna 2021. [44]

Suomalaista kaukolämpösektoria kiinnostava projekti on käynnissä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa, jossa suunnitellaan pelkästään kaukolämmön tuotantoon käytettävää SMR:ää. FinReactor nimellä kulkeva hanke on vasta alkuvaiheessa, mutta se on jo herättänyt paljon mielenkiintoa energia-alalla. Koska laitosta ei ole tarkoitus käyttää sähköntuotantoon, operoidaan sitä pienemmillä paineilla ja alhaisemmissa lämpötiloissa, mikä yksinkertaistaa reaktorirakennetta. Suurin osa reaktorin osista voitaisiin valmistaa Suomessa, jolloin sen kaupallinen tuotanto työllistäisi kotimaista valmistavaa teollisuutta. FinReactor on mitoitettu lämpöteoltaan 24 MW:n suuruiseksi eli sen rakentaminen ei tarvitsisi valtioneuvoston periaatepäätöstä. Kotimainen vaihtoehto ulkomaisien toimijoiden reaktoreille voisi vähentää ydinvoimaa kohtaan koettavia ennakkoluuloja ja saada helpommin hyväksynnän kansan sekä poliitikkojen keskuudessa. [44]

Ydinvoimassa on aina riskinsä. Vaarallinen ydinjäte pitää osata varastoida turvallisesti ja isolla onnettomuudella voi olla tuhoisat seuraukset. Suomi on kuitenkin seismisesti vakaampaa aluetta kuin esimerkiksi ydinonnettomuuksista tällä vuosituhanella kärsinyt Japani ja lainsäädäntö sekä rakennusvaatimukset ydinvoimalle ovat Suomessa tiukimpia maailmassa. Loppusijoituksen suhteen Suomen ydinjätehuollosta vastaava Posiva on vuonna 2015 saanut luvan luolan kaivamiseen Olkiluotoon. Tuohon peruskalliossa sijaitsevaan luolaan on tarkoitus sijoittaa Olkiluodon ja Loviisan ydinvoimaloiden ydinjäte. Loppusijoituspaikan rakennustyöt on aikataulutettu loppumaan 2020-luvun alussa ja tilat on tarkoitus sulkea 2120-luvulla. [45]

Taloudellisesta näkökulmasta SMR:n hyödyntäminen Suomessa on kannattavinta, kun sitä käytetään pohjakuormalaitoksena alueella, jossa lämmön kysyntä on tarpeeksi korkea. Samoin kuin tavallisella ydinvoimalla on SMR:llä varsin korkea alkupääoman tarve,

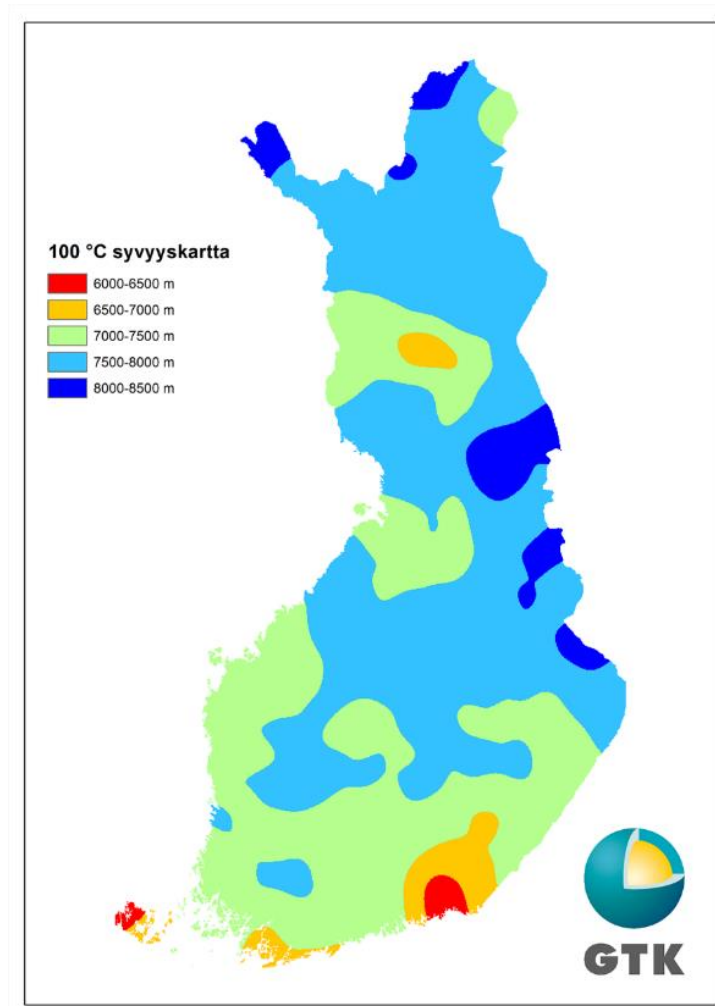
mutta sen muuttuvat kustannukset ovat maltilliset, jolloin isommilla ajotuntimäärillä sijoituksen kannattavuus nousee. Nykyisillä reaktorityypeillä sijoitusten kannattavuuden näkökulmasta pelkän lämmön tuottaminen on suositeltavampaa kuin yhteistuotantolaitoksen rakentaminen. [46]

3.5 Geoterminen lämpö

Maan ytimessä ja kuoressa syntyy jatkuvasti termistä energiaa radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Tämä energia johtuu maankuoressa ylempiin kerroksiin asti, jossa sitä on mahdollista hyödyntää lämmöntuotannossa. Tätä syvällä syntynyttä lämpöä eli geotermistä energiaa ei tule sekoittaa maalämpöön, joka on auringon säteilystä maan pintakerrokseen siirtynyttä matalan lämpötilan omaavaa lämpöä. Maalämmön hyödyntämiseen tarvitaan lämpöpumppu, kun taas geotermistä energiaa voidaan sen korkean lämpötilan ansiosta käyttää usein sellaisenaan osana lämmitysverkostoa. Keskimääräinen geoterminen lämpövirta maapallolla on 87 mW/m^2 , mutta riippuen maaperän laadusta tuo luku voi vaihdella välillä $60\text{-}100 \text{ mW/m}^2$. Geotermisen energian hyödyntämiseen vaikuttaa myös maaperän lämpögradientti, joka määrittää tarvittavan poraussyvyyden riittävien lämpötilojen saavuttamiseksi. Tyypillinen lämpögradientti on $20\text{-}35 \text{ K/km}$ (Kelviniä yhtä kilometriä kohden). [47]

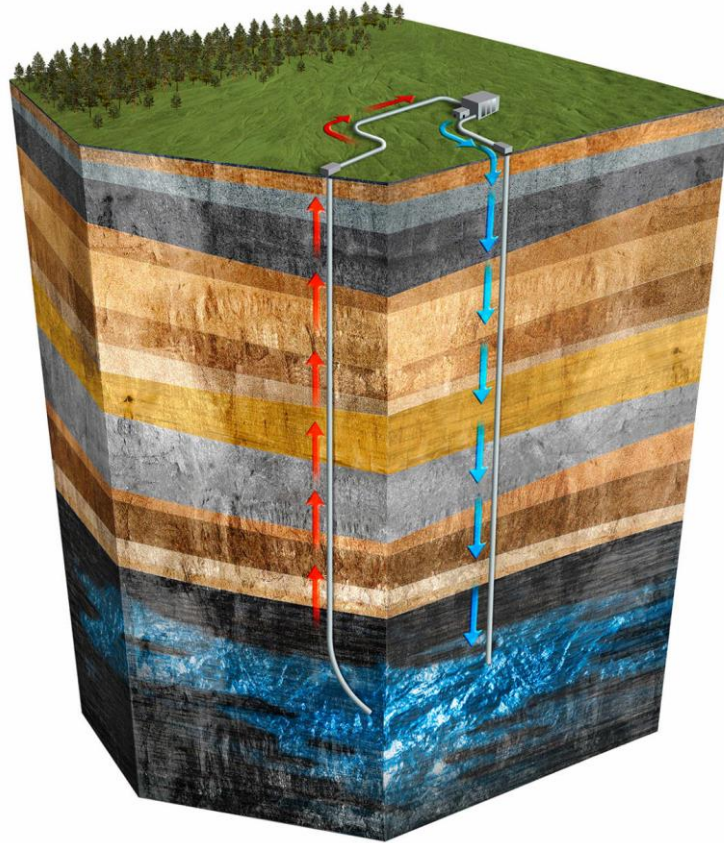
Geotermistä energiaa hyödynnetään erityisen paljon Islannissa, jossa jopa 90% kodeista lämpenee suoraan maasta saatavalla kuumalla vedellä. Maan tuliperäisyys helpottaa geotermisen lämmön hyödyntämistä, sillä Islannin vulkaanisilla alueilla voidaan kilometrin syvyydessä saavuttaa jopa 250 °C:n lämpötiloja. [48]

Suomen kallioperä on lämpöominaisuuksiltaan selvästi huonommin geotermisen lämmön talteenottoon soveltuvaa. Lämpövirran keskimääräiseksi luvuksi on mittauksissa saatu 37 mWm^{-2} , joka on selvästi alle puolet maailmanlaajuisesta keskiarvosta. Lisäksi lämpögradientti Suomessa vaihtelee noin välillä $8\text{-}15 \text{ K/km}$. [49] Kuvassa 3 Geologisen tutkimuskeskuksen julkaisema kartta, josta käy ilmi missä syvyydessä Suomen maaperässä saavutetaan 100 °C:n lämpötila.



Kuva 3. 100 °C syvyysskartta [50]

St1 lanseerasi vuonna 2014 hankkeen, jossa on tavoitteena käyttää geotermistä energiaa lämpölaitoksen lämmön lähteenä Espoon Otaniemessä. St1 Deep Heat – projektissa kallioperään porataan kaksi 6,5 kilometrin reikää, joista toiseen pumpataan vettä. Vesi levittäytyy maaperän rakoihin samalla kumentuen ja palaa toista reikää pitkin takaisin ylös arviolta 120-asteisena. Tämän jälkeen vesi luovuttaa lämpönsä lämmönvaihtimien kautta kaukolämpöverkkoon. St1 on arvioinut, että valmiina lämpölaitos pystyy tuottamaan jopa 40 MW lämpöenergiaa. [51] Kuvassa 4 voimalan toimintaperiaate havainnollistettuna.



Kuva 4. Periaatekuva Deep Heat -lämpölaitoksen toiminnasta [51]

Deep Heat on kohdannut taipaleellaan runsaasti ongelmia. Poraustekniikkaa on jouduttu vaihtamaan kesken projektin vesivasaroinnista perinteiseen kiertoporaukseen, joka on sekä kalliimpaa, että hitaampaa. Lisäksi tuotannon aloittaminen on myöhästynyt alkupe-
räisestä suunnitelmasta. Kesällä 2018 suoritettu särötys eli kallioperässä olevien hiushalkeamien avaaminen aiheutti pieniä maanjäristyksiä, jotka kantautuivat työmaalta pitkälle Helsinkiin. Tapahtumien jälkeen ympäristöministeriö tilasikin Seismologian insti-
tuutilta ja Geologian tutkimuskeskukselta raportin geotermisen lämmöntuotannon ris-
keistä. [52]

St1:n lisäksi myös Helenillä, Tampereen Sähkölaitoksella ja Turku Energialla on suunni-
telmia geotermisten lämpölaitosten käytöstä. Tampereella Nekalaan ollaan poraamassa
7-8 kilometrin syvyistä lämpökaivoa, jonka tuottaman lämmön Tampereen Sähkölaitos
ostaa [53]. Turku Energia taas on solminut lämpölaitoksen rakentamisesta aiesopimuk-
sen St1:n kanssa ja sen virallinen vahvistaminen odottaa Espoon pilottihankkeen val-
mistumista [54]. Helen on aloittanut yhdessä Geologian tutkimuskeskuksen kanssa maa-
peräkartoitukset Helsingin keskustassa potentiaalisten lämmöntuotantoon soveltu-
vien alueiden löytämiseksi [55].

Geoterminen energia on porausta lukuun ottamatta päästötöntä ja sitä on runsaasti saatavilla maankuoressa. Sen laajemman käytön esteenä Suomessa näyttäisi olevan etenkin taloudellinen kannattavuus. Geotermisen lämpölaitoksen taloudelliset kustannukset muodostuvat isolta osalta porauksen aiheuttamista kuluista ja koska Suomen maaperä on graniittiperäistä eikä yhtä huokoista kuin muualla Euroopassa, ovat myös porauksen kesto ja kustannukset suuremmat. Lisäksi huonojen lämpöominaisuuksien vuoksi Suomessa joudutaan porautumaan huomattavasti syvemmälle kallioperään. Isojen investointikustannusten vuoksi geotermisen lämmön laajempi käyttö ei siis välttämättä ole järkevää ennen parempien poraustekniikoiden kehittymistä.

4. YHTEISKUNNALLISET PÄÄTÖKSET

Yhteiskunnalliset päätökset ja valtion jakamat energiatuet sekä investointituet vaikuttavat kaukolämmön kehittymiseen ja uusien teknologioiden käyttöönottoon. Verotuksella on merkittävä asema tuotantotapojen kannattavuutta vertailtaessa ja sähköä sekä lämmöntuotantoa yhdistettäessä.

4.1 Kivihiilen käyttökielto ja energiatuet

Merkittävin viime vuosien kaukolämpöön vaikuttava yhteiskunnallinen päätös on ollut kivihiilen energiakäytön vuodesta 2029 eteenpäin kieltävä laki, joka vahvistettiin 29.3.2019. Kivihiilen käyttökielto astuu voimaan 1.5.2029 mutta reilusti ennen sitä kivihielestä luopuville energiayhtiöille on tarjolla kannustepaketti. Vuoteen 2025 mennessä kivihielestä luopuville kaupungeille ja niiden kaukolämpöyhtiöille on kasattu 90 miljoonan euron kannustepaketti, jonka tarkoituksena on auttaa korvaavien tuotantotapojen investointikustannuksissa. Tuki jakautuu puoliksi uusiutuvalla CHP-tuotannolle ja puoliksi muille teknologioille. [56]

Työ- ja elinkeinoministeriö myönsi vuonna 2019 13,4 miljoonaa euroa investointitukea kolmelle suurelle uuden energiateknologian demohankkeelle. Yhteensä tukea oli jaossa 40 miljoonaa euroa, jonka jakamatta jäänyt osa siirtyi vuonna 2020 käytettäväksi. Tukea saaneista kaksi hanketta liittyi kaukolämmön kehittämiseen. Salossa toimivalle Lounasvoima Oy:lle myönnettiin lähes 3 miljoonaa euroa kaukolämpöverkon energiavarastojen rakentamiseen. Lisäksi Helen sai 7,9 miljoonaa euroa kaasutus-biojalostamolaitoksen rakentamiseen. [57] Kyseisen laitoksen on tarkoitus ensisijaisesti jalostaa biomassasta ja vaikeasti kierrätettävistä materiaaleista uusia raaka-aineita mutta myös syöttää prosessissa sivutuotteena syntyvä hukkalämpö kaukolämpöverkkoon [58]. Investointituen saaneiden lisäksi on syytä huomata, että esimerkiksi Helenin hakemaa 5,4 miljoonan tukea geotermisen pilottilämpölaitoksen rakentamiseen ei myönnetty. Myönnetyn tuen ulkopuolelle jäi lisäksi Turun Seudun Energiatuotannon Naantalin CHP-laitoksen nelosyksikölle hakema 2 miljoonan tuki, joka oli tarkoitus kohdentaa SRF-investointiin (Solid Recovered Fuel, polttokelpoinen jäte). [57]

4.2 Verotus

Verotuksella voidaan ohjata energiantuotantoa ja vaikuttaa erilaisten teknologioiden hyödyntämisen taloudelliseen kannattavuuteen. Tiettyjen polttoaineiden verotuksen korottamisella kannustetaan vaihtamaan polttoaine sellaiseen, jonka hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät. Lisäksi poistamalla kokonaan verovelvollisuus tietyiltä polttoaineilta nostetaan kyseisellä polttoaineella käyvien laitosten kannattavuutta merkittävästi. Biopolttoaineista ei esimerkiksi tarvitse lämmöntuotannon yhteydessä maksaa veroa tai huoltovarmuusmaksua, kun kivihiilen ja maakaasun käytöstä veloitetaan energiasisältövero, hiilidioksidivero sekä toimintavarmuusmaksu [59].

Veron määrä ei ole ainoa kannattavuuteen vaikuttava asia. Voimalaitosympäristössä se miten esimerkiksi verotuksessa määritetään laitoksen omakäyttöön kuuluva sähkö, ja miten lasketaan laitoksen tuottama lämpö voi nostaa kustannuksia merkittävästi. Nykyisessä tilanteessa esimerkiksi CHP-laitoksen yhteyteen lisätyn lämpöpumpun käyttämä sähkö katsotaan kuuluvaksi laitoksen omakäyttöön, jolloin siitä ei makseta veroa mutta sen tuottama lämpö lasketaan mukaan laitoksen tuottamaan hyötylämpöön. Yhteistuotantolaitokset maksavat polttoaineestaan veroa kulutukseen luovutetun lämpömäärän perusteella eli lämpöpumpun liittäminen laitoksen yhteyteen nostaa polttoaineeverosta koituvia kuluja. Jos taas lämpöpumppu toimii omassa erillisessä ja itsenäisessä laitoksessaan, menetetään käytetyn sähkön verottomuus, mutta tuotettua lämpöä ei lasketa voimalaitoksen hyötylämpöön, vaikka lämmön lähteenä hyödynnettäisiin voimalaitoksen lämpövirtoja. Datakeskuksien kuluttama sähkö kuuluu halvempaan veroluokkaan 1, mutta jos konesalissa syntyvää hukkalämpöä otetaan talteen lämpöpumpulla, verotetaan sen käyttämää sähköä jälleen korkeamman veroluokan mukaan. [31]

Nykyinen verotus rankaisee hukkalämpövirtojen hyödyntämisestä lämpöpumpuilla verottamalla tuotantoa usein kahdesti. Jos kaukolämpösektorin päästöjä halutaan vähentää, tulisi verotuksella kannustaa energiatehokkuuden lisäämiseen ja resurssien hyödyntämiseen kokonaisuudessaan. Turhan korkea verotus lisää lämpöpumppujen käyttökustannuksia, joka taas laskee niihin tehtävän investoinnin kannattavuutta. Tämä rajoittaa lämpöpumppujen tarjoamien mahdollisuuksien hyödyntämistä.

5. YHTEENVETO

Kaukolämmöllä on Suomessa pitkä historia, ja se on vakiintunut kaupunkien ja taajamien pääasialliseksi lämmitysmuodoksi. Suomen ilmaston vuoksi lämmitystarve on suuri useina kuukausina vuodesta, ja Suomen energiankulutuksesta neljännes kuluu rakennusten lämmitykseen. Koko energiasektorin päästöjä leikattaessa on kaukolämmön rooli merkittävä. Siirtyminen fossiilista polttoaineista uusiutuviin tuotantotapoihin vaatii isoja investointeja uusiin teknologioihin ja paljon kehitystyötä.

Tulevaisuudessa avainasemassa kaukolämmön tuotannossa ovat lämpöpumput. Niiden avulla on mahdollista hyödyntää monenlaisia lämmönlähteitä, jotka tällä hetkellä ovat taloudellisesti kannattamattomia tai teknisesti liian vaikeasti hyödynnettävissä. Lämpöpumput yhdistettynä lämpövarastoon ovat erinomainen tapa lisätä kaukolämpöverkkoon joustavuutta ja leikata huippulämpölaitosten ajotunteja. Uusiutuvan ja vaihtelevan sähköntuotannon kasvaessa voivat lämpöpumput toimia apuna tasaamassa sähkötasetta.

Hukkalämpöjen hyödyntäminen lämmöntuotannossa on taloudellisesti kannattavaa ja vähentää päästöjä lämmöntuotannosta. Hukkalämpövirtojen tunnistaminen ja talteenotto kaukolämpöverkkoon parantaa yleistä energiatehokkuutta ja lisää kestäväen tuotannon osuutta lämmityksessä. Hukkalämmönlähteet voivat olla isoja teollisuusalueita tai yksittäisiä rakennuksia, kuten kauppakeskuksia. Myös Suomeen viime vuosina saapuneet suuret datakeskukset ovat loistavia kohteita hukkalämmön talteenottoon, sillä niissä yhdistyy samanaikaisesti jäähdytyksen tarve ja lämmön tuotto. Lämpöpumpun avulla datakeskus saadaan viilennettyä ja lämpö otettua talteen kaukolämpöverkkoon.

Kokeellisella asteella olevat pienet ydinreaktorit voisivat ratkaista tehokkaasti lämmöntuotannon päästöongelman. Niiden rakentaminen kaukolämpökäyttöön lähelle kaupunkia onnistuisi helpommin kuin isojen ydinvoimaloiden, ja niiden skaalautuvuus eri alueiden tarpeisiin modulaarisuuden ansiosta tarjoaa valinnanvaraa erilaisten kaupunkien ja taajamien lämmöntuotannon suunnitteluun. Matalien muuttuvien kustannusten vuoksi SMR:n mitoittaminen alueen pohjakuormalaitokseksi toisi parhaan taloudellisen hyödyn.

Geotermisen lämpö olisi helpoimmin hyödynnettävää uusiutuvaa lämpöenergiaa, mutta Suomen kallioperän huonot lämpöominaisuudet tekevät sen saavuttamisesta vaikeaa. Kovan graniittisen kallion läpi syvälle poraaminen on kallista ja nostaa geotermisen lämpölaitoksen investointikustannukset kannattamattomalle tasolle. Ennen poraustekniikoiden kehittymistä ei kovin syvien geotermisten porausreikien tekeminen ole kannattavaa.

Tekniikan vielä kehittyessä on kuitenkin hyvä jo kartoittaa mahdollisia geotermisten lämpölaitosten sijoituspaikkoja, kuten esimerkiksi Helen tekee.

Politiikan tarkoituksena on ohjata yhteiskuntaa haluttuun suuntaan. Lämmöntuotannossa viime vuosien lakimuutokset ovat selvästi ohjaamassa kaukolämpöyhtiötä korvaamaan fossiiliset polttoaineet nopealla aikataululla uusiutuvilla tuotantomuodoilla. Kivihiilen käyttökielto astuu voimaan 2029 ja ennen sitä korvaava tuotantokapasiteetti pitää luoda tilalle. Työ- ja elinkeinoministeriön investointituet auttavat uusien hankkeiden kehittämisessä ja testaamisessa. Lämpöpumppujen veroluokkaa muuttamalla niihin tehtävien investointien tuotto-odotukset paranisivat ja useammat kaukolämpöyhtiöt näkisivät pumppulaitoksiin panostamisen kannattavana.

LÄHTEET

- [1] L. Koskelainen, A. Nuorkivi, R. Saarela, K. Sipilä, Kaukolämmön käsikirja, Energiateollisuus ry, Helsinki, 2006
- [2] Suomen virallinen tilasto (SVT), Sähkön ja lämmön tuotanto, 2018, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://www.stat.fi/til/salatuo/2018/salatuo_2018_2019-11-01_tie_001_fi.html
- [3] H. Hillamo, Kaukolämpöverkot Suomessa, 2019, seminaariesitys, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://energia.fi/files/3982/Hillamo_Kaukolampoverkot_Suomessa_KL-paivat_2019_.pdf
- [4] Country by Country – Statistics Overview, Euroheat & Power, 2016, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/03/2015-Country-by-country-Statistics-Overview.pdf>
- [5] Energian loppukäyttö, Motiva Oy, 2019, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto
- [6] M. Huhtinen, R. Korhonen, T. Pimiä, S. Urpalainen, Voimalaitostekniikka, 2008
- [7] K. Kirvelä, Vastapainevoima. Teoksessa L. Sihvo (toim.), Tekniikan käsikirja 4, 1969
- [8] Kaukolämpötilasto 2018, Energiateollisuus ry, 2019, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://energia.fi/files/3935/Kaukolampotilasto2018.pdf>
- [9] Energian alkuperä, Helen Oy, 2019, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://www.helen.fi/yritys/energia/energiantuotanto/energian-alkupera>
- [10] Alkuperä, Tampereen Sähkölaitos Oy, 2019, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://www.sahkolaitos.fi/lampoa-ja-viileytta/lamporatkaisut/alkupera/>
- [11] Sähköntuotannon CO₂-päästöarvio, Fingrid, 2019, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformatio/co2/>
- [12] Älykäs kaupunkienergia, Pöyry Management Consulting Oy, 2018, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://energia.fi/files/2862/Alykas_kaupunkienergia_LOP-PURAPORTTI_20180614.pdf
- [13] Hukkalämpöjen hyödyntäminen kaukolämpöjärjestelmässä, Energiateollisuus ry, 2018, tekninen ohje, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://energia.fi/files/3127/Hukkalammot_kaukolampoverkkoon_tekniset_ohjeet_20181016.pdf
- [14] Kaukolämpöverkkoja yli 15 000 km, Energiateollisuus ry, 2019, Saatavissa (viitattu 28.11.2019): <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>
- [15] Kaukolämpövuosi 2018, Energiateollisuus ry, 2019, tiedote, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://energia.fi/julkaisut/materiaalipankki/kaukolampovuosi_2018_kivihiilen_kaytto_kaukolammossa_vahentynyt.html

- [16] Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961, Ilmatieteenlaitos, Saatavissa (viitattu 15.01.2020): <https://ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>
- [17] M. Rämä, R. Niemi, L. Similä, Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, VTT asiakasraportti, Espoo, 2015, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>
- [18] Haasteista mahdollisuuksia – sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050, Energiateollisuus ry, 2010, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): https://energia.fi/files/238/Hiilineutraali_visio_vuodelle_2050.pdf
- [19] Kaukolämpöalan strategia, Energiateollisuus ry, 2013, Saatavissa (viitattu 25.01.2020): https://www.adata.fi/wp-content/uploads/2019/09/Kaukol_strategia_FI.pdf
- [20] M. Raiko, N. Honkasalo, Biopolttoaineiden soveltuminen säätötehon tuotantoon, 2012, Saatavissa (viitattu 24.01.2020): https://www.vtt.fi/files/projects/bio-hiili/markku_raiko.pdf
- [21] Helen valmiina kivihiilestä luopumiseen, uutinen, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.helen.fi/uutiset/2018/kivihiililaki>
- [22] Kestävä Tampere 2030 -tiekarttaluonnos – miten hiilineutraalia kaupunkia tehdään, seminaariesitys, Saatavissa (viitattu 23.01.2020): <https://www.tampere.fi/asuminen-ja-ymparisto/ymparisto-ja-luonto/kestava-kehitys/ymparistopoliittika-ja-ilmastotavoitteet/kestava-tampere-2030-tiekartta.html>
- [23] Turun Ilmastoraportti 2018, Saatavissa (viitattu 21.01.2020): https://www.turku.fi/sites/default/files/atoms/files/turun_ilmastosuunnitelman_2029_raportti_2018_kv_20.5.2019_002.pdf
- [24] TSE pysäyttää lopullisesti Naantalın kivihiilikäyttöisen kakkosyksikön, verkkosivusto, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.tset.fi/tse-pysayttaa-lopullisesti-naantalın-kivihiilikayttoisen-kakkosyksikon-1-7-2020/>
- [25] P. Kumar, Thermodynamics, Dorling Kindersley, New Delhi, 2013
- [26] How Does a Heat Pump Work, International Energy Agency, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 26.01.2020): <https://heatpumpingtechnologies.org/market-technology/heat-pump-work/>
- [27] Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit, Pöyry Management Consulting Oy, Helsinki, 2016, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.sitra.fi/julkaisut/kaksisuuntaisen-kaukolammon-liiketoimintamallit/>
- [28] Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, VALOR Partners Oy, 2016, Saatavissa (viitattu 21.01.2020): https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopumput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf
- [29] Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä, Helen Oy, blogiteksti, 2019, Saatavissa (viitattu 23.01.2020): <https://www.helen.fi/yri-tys/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/merivesilampopumput>
- [30] Helsinkiin rakennetaan jälleen uusi lämpöpumppu, Helen Oy, uutinen, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.helen.fi/uutiset/2018/uusilampopumppu>

- [31] Energiaverotusohje, Verohallinto, 2019, Saatavissa (viitattu 26.01.2020): <https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56206/energiaverotus/#4.2-voimalaitoksen-m%C3%A4%C3%A4ritelm%C3%A4>
- [32] I. Heikkilä, T. Kiuru, Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen, Motiva Oy, 2014, Saatavissa (viitattu 23.01.2020): https://www.motiva.fi/files/13515/Ylijaa-malammon_taloudellinen_hyodyntaminen_Ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf
- [33] Kilpilahden hukkalämpöhanke etenee, Helen Oy, uutinen, 2020, Saatavissa (viitattu 23.01.2020): <https://www.helen.fi/uutiset/2020/kilpilahti2>
- [34] Neste ja TSE selvittävät mahdollisuuksia Naantalın jalostamon hukkalämpöjen hyödyntämiseen, Turun Seudun Energiatuotanto Oy, uutinen, 2019, Saatavissa (viitattu 25.01.2020): <https://www.tset.fi/neste-ja-tse-selvittavat-mahdollisuuksia-naantalın-jalostamon-hukkalampojen-hyodyntamiseen/>
- [35] K. Kantanen, E. Martikainen, B. Basalisco, Finland's economic opportunities from data centre investments, Copenhagen Economics, 2017, Saatavissa (viitattu 20.01.2020): <https://www.copenhageneconomics.com/publications/publication/finlands-economic-opportunities-from-data-centre-investments>
- [36] M. Wahlroos, M. Pärssinen, J. Manner, S. Syri, Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating, Energy, Vol 140, 2017, pp. 1228-1238
- [37] Kaukolämpö on lähilämpöä, Nivos Oy, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 24.01.2020): <https://www.nivos.fi/kaukolampo-on-lahilampo-0>
- [38] K. Sartor, P. Dewallef, Integration of heat storage system into district heating networks fed by a biomass CHP plant, Journal of Energy Storage, Vol. 15, 2018, pp. 350-358
- [39] S. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques, Energy Conversion and Management, Vol. 39, 1998, pp. 1127-1138
- [40] Technology, Polar Night Energy, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 25.01.2020): <https://polarnightenergy.fi/technology>
- [41] V. Tulkki, E. Pursiheimo, T. Lindroos, District heat with Small Modular Reactors (SMR), VTT, 2017, Saatavilla (viitattu 25.01.2020): <https://cris.vtt.fi/en/publications/district-heat-with-small-modular-reactors-smr>
- [42] EU:n 2030 ilmasto- ja energiapolitiikan linjausten toteutusvaihtoehdot ja Suomen omien energia- ja ilmastotavoitteiden toteutuminen, Pöyry Management Consulting Oy, 2016, Saatavilla (viitattu 24.01.2020): <https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=12101>
- [43] Modulaarinen pieni kaukolämpöreaktori (SMR) – Onko ydinvoimala turvallinen lähellä asuinalueita, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, uutinen, 2019, Saatavilla (viitattu 26.01.2020): https://www.lut.fi/uutiset/-/asset_publisher/h33vOeufOQWn/content/modulaarinen-pieni-kaukolamporeaktori-smr-onko-ydinvoimala-turvallinen-lahella-asuinalueita-

- [44] L. Mäkelä, SMR (Small Modular Reactors) -selvitys, FinNuclear ry, 2019, Saatavilla (viitattu 26.01.2020): https://finnuclear.fi/wp-content/uploads/2019/10/201908_SMR-selvitys-Finnuclear-ry.pdf
- [45] Loppusijoitus, Posiva Oy, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 24.01.2020): www.posiva.fi/loppusijoitus
- [46] K. Värri, S. Syri, The Possible Role of Modular Nuclear Reactors in District Heating: Case Helsinki Region, Energies, Vol. 12, 2019'
- [47] D. Banks, An introduction to thermogeology ground source heating and cooling, 2nd ed., Wiley-Blackwell, 2012
- [48] Geothermal, Orkustofnun National Energy Authority, verkkosivu, Saatavilla (viitattu 18.01.2020): <https://nea.is/geothermal/>
- [49] I. Kukkonen, Geothermal Energy in Finland, seminaariesitys, 2000, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2000/R0778.PDF>
- [50] Geotermisen energian potentiaalikartta, Geologian tutkimuskeskus, 2019, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <http://www.gtk.fi/ajankohtaista/media/uutisarkisto/index.html?year=2019&newsType=PressReleases&number=884>
- [51] Geolämpö, St1, verkkosivu, <https://www.st1.fi/geolampo>
- [52] Lämpövoimatyömaalla syntyy maanjäristyksiä – kukaan ei tunne riskejä tarkkaan, Helsingin yliopisto, uutinen, 2019, Saatavissa (viitattu 25.01.2020): <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/luonnontieteet/lampovoimalatyomaalla-syntyymaanjaristyksia-kukaan-ei-tunne-riskeja-tarkkaan>
- [53] Tampereella porataan jopa 8 kilometrin syvyyteen lämpökaivo, joka lämmittäisi tuhat pientaloa, Yle Uutiset, 2018, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://yle.fi/uutiset/3-10559627>
- [54] Geotermistä energiaa maan uumenista, Turku Energia Oy, tiedote, 2016, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.turkuenergia.fi/turku-energia/vastuullista-energiaa/uusiutuvat-energialahteet/geoterminen-energia/>
- [55] Helen selvittää geolämmön mahdollisuuksia, Helen Oy, uutinen, 2019, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.helen.fi/uutiset/2019/geoterminen>
- [56] Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa, Valtioneuvosto, tiedote, 2019, Saatavissa (viitattu 25.01.2020): https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa?_101_INSTANCE_YZfcyWxQB2Me_groupId=1410877
- [57] 15 yritystä haki investointitukea uuden energiateknologian suuriin demonstraatiohankkeisiin, Työ- ja elinkeinoministeriö, tiedote, 2019, Saatavissa (viitattu 25.01.2020): https://tem.fi/artikkeli/-/asset_publisher/15-yritysta-haki-investointitukea-uuden-energiateknologian-suuriin-demonstraatiohankkeisiin
- [58] Vuosaaren kehitetään kaupunkijalostamo, Helen Oy, uutinen, 2019, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://www.helen.fi/uutiset/2019/kaupunkijalostamo>

- [59] Energiaverotus, Valtionvarainministeriö, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 27.01.2020): <https://vm.fi/energiaverotus>