



Maalämpöpumpun ohjelmistoperusteinen hallinta, vikadiagnosointi ja kysyntäjousto liikekiinteistöissä

Roope Vainio

Opinnäytetyö, AMK

Syyskuu 2021

Teollisuustekniikan-ala

Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka

Roope Vainio

Maalämpöpumpun ohjelmistoperusteinen hallinta, vikadiagnosointi ja kysyntäjousto liikekiinteistöissä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Elokuu 2021, 54 sivua

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: Kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyön aiheena oli tutkia, miten maalämpöpumpun prosessien mitatusta datasta pystytään ennustamaan ja havaitsemaan vikatilanteita ja huollontarpeita, onko maalämpöpumppu soveltuva sovelluspohjaiseen ajamiseen sekä kuinka paljon maalämpöpumpulla voidaan tarjota säätövoimaa kysyntäjoustopuolelta. Opinnäytetyö toteutettiin laadullisena kehittämistyönä.

Automaattisen kunnonvalvontajärjestelmän hälytyksiä varten tutkittiin maalämpöpumpun optimaalista toimintaa sekä yleisiä vikatilanteita. Näiden avulla luotiin hälytykset, jotka mitatun datan avulla kertovat maalämpöpumpun vikatilanteista ja huollontarpeista. Lisäksi näille hälytyksille määritettiin todennäköiset korjaustoimenpiteet, joita huoltohenkilöstö voi hyödyntää maalämpöpumppua korjatessa.

Maalämpöpumpun yleisten säätö- ja ohjauspisteiden avulla tutkittiin edellytyksiä toteuttaa maalämpöpumpuille sovelluspohjaista ajamista esimerkiksi koneoppimismallin avulla. Työssä tutkittiin maalämpöpumpun sisäisen prosessin ajamista, eli kylmäkierron ja lämmönkeruuputkiston optimoimista sekä yksinkertaisempaa mallia, jossa maalämpöpumpun tehoja voidaan säädellä tarpeenmukaisesti lämmitystarpeen mukaan.

Maalämpöpumpun soveltuvuutta kysyntäjoustopuolelta tutkittiin määrittämällä laskennallisesti sisälämpötilan käyttäytymisen tilanteessa, jossa maalämpöpumpun tehot joko pudotetaan 0 %:n tai 60 %:n -25 °C sekä -5 °C ulkolämpötiloissa. Sisälämpötilan pudotuksen myötä pystyttiin määrittämään kuinka pitkään ja kuinka suurella tehonpudotuksella voidaan tarjota säätövoimaa reservimarkkinoille. Esimerkkejä absoluuttista tehomääristä saatiin, kun selvitettiin eri kokoisten maalämpöpumppujen ottotehoja.

Työn jälkeen havaittiin tarve toteuttaa tapaustutkimus näistä jokaiselle osa-alueelle. Ilman kunnonvalvonnan hälytysten käytännönläheistä kokeilemistä, niiden laatua ei voida todentaa. Sovelluspohjaisen ajamisen ongelmana on käytännön toteutusten vaihtelevuus ja sisälämpötilan kehittymisen laskennallisessa selvittämisessä ei huomioitu esimerkiksi ihmisen käyttäytymistä.

Avainsanat (asiasanat)

Maalämpöpumppu, lämmitys, kunnonvalvonta, säätövoima

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

.

Roope Vainio

Software based management, fault diagnostics and demand response of geothermal heat pump in commercial buildings

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, August 2021, 54 pages

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

Subject of thesis was to study how one could forecast and detect the issues and need for maintenance of geothermal heat pump processes, if geothermal heat pump can be run with software-based program and if geothermal heat pump is able to offer, and how much of, adjustment power on demand response reserve and balancing power markets. Thesis was conducted on qualitative development study.

To create automatic condition monitoring alarms it was studied on how geothermal heat pump operates optimally and the most common failures were determined. Alarms of failure situations and needs of optimization that can be analyzed from measured data were generated. Additionally, the most likely maintenance procedures were generated for these alarms.

General adjustment and control points of geothermal heat pump were determined and the requirements of implementing software-based controlling for example with machine learning algorithms were studied. Two options for software-based controlling were studied. First one was to control and optimize the whole process of geothermal heat pump and the second option was to control the heating power that the heat pump generates.

On implementing the geothermal heat pump to reserve and balancing power markets it was important to determine indoor air temperatures trend when shutting off all heating power. Indoor temperatures decline was calculated on 0 % and 60 % of needed heating power when outdoor temperature is -25 °C and -5 °C. When indoor temperature trend is known, the absolute amount and length of adjustment power can be determined if the intake power of geothermal heat pump is known.

After the study it was noticed that a case-study needs to be conducted on each of these situations. Without practically testing the automatic condition monitoring alarms, their quality can't be assessed. Issue of software-based controlling is the large variety of control systems that geothermal heat pumps have, and the calculation of indoor temperature trend is only an estimation that needs to be tested on real building.

Keywords/tags (subjects)

Geothermal heat pump, heating, condition monitoring, adjustment power

Miscellaneous (Confidential information)

.

Sisältö

1	Johdanto	4
1.1	Tutkimusasetelma ja tavoitteet	5
1.2	Tutkimusmenetelmät	7
1.3	Rajaukset	9
1.4	Toimeksiantaja	9
1.5	Työn luotettavuus ja eettisyys	10
2	Maalämpöpumppu ja lämmönkeräyspiiri	10
2.1	Maalämpöpumppu yleisesti	10
2.2	Maalämpöpumpun toiminta	11
2.3	Lämmönkeruupiiri	12
2.4	Lämpöpumpun toiminta	13
2.4.1	Kompressori	15
2.4.2	Höyrystin ja Lauhdutin	15
2.4.3	Paisuntaventtiili	16
3	Maalämpöpumpun seuranta	17
3.1	Lämmönkeruupiirin mittaukset	18
3.2	Maalämpöpumpun mittaukset	18
4	Kysyntäjousto	19
4.1	Sähköverkko	20
4.1.1	Inertia	21
4.2	Reservimarkkinat	22
4.3	Maalämpö kysyntäjoustopissa	25
4.4	Kysyntäjoustopin tuotot	25
4.4.1	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi	25
5	Automaattinen vikatilanteiden diagnosointi	26
5.1	Energiatehokkuuden seuranta	27
5.2	Ohjausvalvonta	28
5.3	Keruupiirin vikatilanteet	28
5.4	Maalämpöpumpun vikatilanteet	29
5.4.1	Kompressori	29
5.4.2	Lauhdutin	30
5.4.3	Huonelämpötila	30
5.5	Vikatilanteiden perusteella luotavat Diagnostiikat	31

6	Maalämpöpumpun sovelluspohjaisen ajamisen edellytykset.....	34
6.1	Maalämpöpumpun ohjaaminen	34
6.2	Säätöpisteet	35
6.3	Ohjauspisteet	35
6.4	Ennusteiden hyödyntäminen	36
7	Kysyntäjousto ja maalämpöpumppu	36
7.1	Maalämpöpumppujen tehot.....	36
7.1.1	Maalämpöpumpun tehojen säätö	37
7.2	Kuormien aggregointi.....	37
7.3	Rakennuksen sisälämpötilan lasku pudotettaessa lämmitystehoja	38
7.4	Säätövoima tehojen laskemisella.....	42
7.4.1	Säätövoiman määrä verrattuna FCR-markkinoihin	43
7.5	Säätövoima tehojen nostamisella	44
7.6	Kuorman riittävyys	44
8	Johtopäätökset.....	45
9	Pohdinta.....	47
	Lähteet	50
	Liitteet	54
	Liite 1. Porakaivon rakenne.....	54

Kuviot

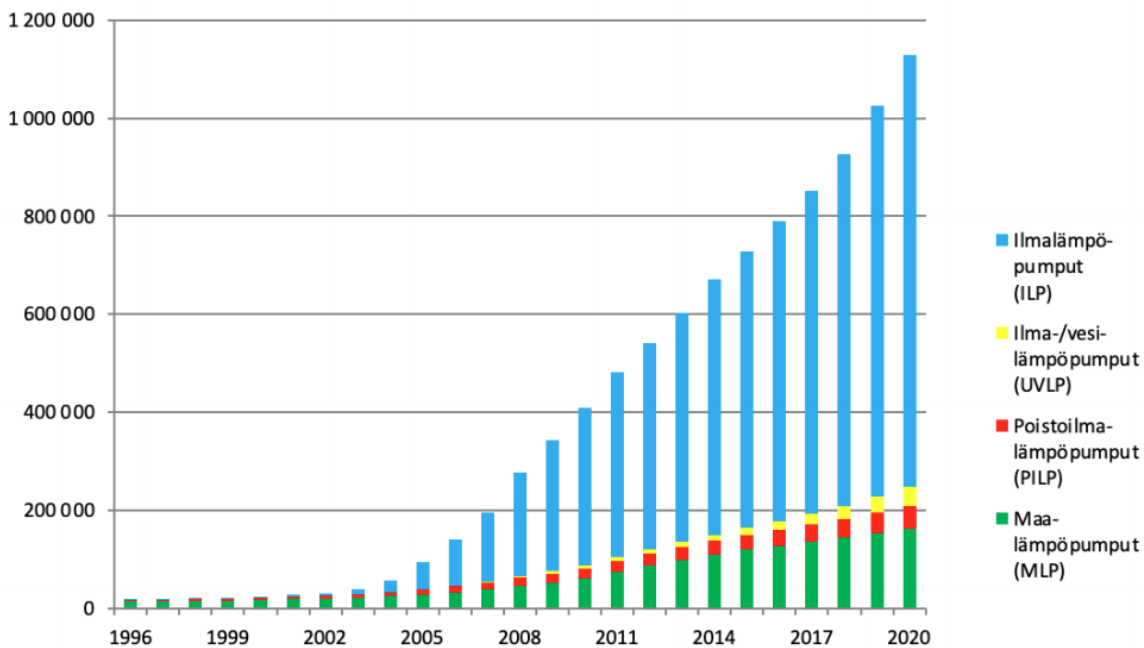
Kuvio 1.	Suomeen myydyt lämpöpumput, kumulatiivinen	4
Kuvio 2.	Kehittämistutkimuksen kehittämissyklin vaiheet	8
Kuvio 3.	Teoreettinen lämpötila-syvyyskäyrä	11
Kuvio 4.	Maalämpöpumppu.....	14
Kuvio 5.	Levylämmönsiirtimen rakenne	16
Kuvio 6.	Paisuntaventtiilin yksinkertaistettu rakenne	17
Kuvio 7.	Sähkön kulutuksen ja tuotannon suhde toukokuussa 2021	21
Kuvio 8.	Eri reservimarkkinalajit	22
Kuvio 9.	FCR:n aktivoituminen taajuuden funktiona	23
Kuvio 10.	Keskiraskaan toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittyminen -25 °C ulkolämpötilassa 0 % ja 60% lämmitysteholla ensimmäisen vrk aikana	41
Kuvio 11.	Keskiraskaan toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittyminen -5 °C ulkolämpötilassa 0 % ja 60% lämmitysteholla ensimmäisen vrk aikana	42

Taulukot

Taulukko 2. Vikatilanteet ja korjausehdotukset	31
Taulukko 3. Toimistorakennuksien lämpökapasiteetti	38
Taulukko 4. Rakennusten maksimi tehontarve pinta-ala yksikköä kohti	39
Taulukko 5. Lähtötiedot toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittymisen laskentaan	39

1 Johdanto

Suomessa maalämpö on vuosituhannen vaihteen jälkeen kasvattanut suosiotaan huomasti. Kuviossa 1 voidaan havaita maalämpöpumppujen kokonaismäärän kasvaneen vuoden 2000 hieman yli 10 000 kappaleesta yli 150 000 kappaleeseen vuoteen 2020 mennessä ja sama trendi on oletettava tulevaisuudessa (Suomen lämpöpumpputilastot 2020). Maalämpö lämmitysmuotona on suuren investoinnin jälkeen edullista ja usein takaisinmaksuaika on lyhyempi kuin muilla lämmitysratkaisuilla. Maalämpö on myös käyttäjälle hyvin huoltovapaata ja se tuottaa vain vähän päästöjä.



Kuvio 1. Suomeen myydyt lämpöpumput, kumulatiivinen (Suomen lämpöpumpputilastot 2020)

Maalämmön tuottamasta energiasta noin 2/3 on maaperästä otettua lämpöenergiaa ja 1/3 sähköenergiaa, jota tarvitaan maalämpöpumpussa lämpöenergian talteenottoon. Mikäli lämpöpumpun tarvittava sähköenergia pystytään tuottamaan uusiutuvilla energialähteillä, voidaan maalämpöä tällöin pitää päästöttömänä energiamuotona. Energiaa se kuluttaa ainoastaan sen verran, mitä maalämpöpumppujärjestelmän omaan toimintaan kuluu sähköä. Muun lämmitysenergian, kuten öljyn ja maakaasun hinta on lähivuosina ollut nousussa, joten maalämpö on osa luontaista kehitystä lämmitysmuotona. Maalämpöpumppu mitoitetaan useimmiten osatehoille siten, että se kattaa 60–80 % rakennuksen mitoitustehosta, jolla tuotetaan noin 95–99 % vuotuisesta energiantarpeesta, joten osatehoille mitoitettaessa rinnalla on tarpeellista jokin toinen lämmitysmuoto, jolla katetaan lämmitystarpeen huipputilanteet. (Maalämpöpumppu 2020.)

Ilmastonmuutos ohjaa tulevaisuuden energiankäyttöä ja lämmitysratkaisuja. Tulevaisuudessa uusiutuvan energian käyttöä on lisättävä lämmitysenergian tuotantoon, jotta lämpöenergiatuotantoon käytetyt hiilidioksidipäästöt saadaan kestäväälle tasolle. Maailmalla mitataan kestävää luonnonvarojen käyttöä esimerkiksi ylikulutuspäivällä, joka oli vuonna 2021 elokuun 22. päivä.

Suomessa vastaava päivä oli 5.4., eli huomattavasti aikaisemmin kuin koko maapallon ylikulutuspäivä (Ylikulutus 2021). Ylikulutuspäivä tarkoittaa sitä päivää, jolloin kestävästi käytettyjen luonnonvarojen vuosittainen kapasiteetti on käytetty ja jäljellä oleva vuosi eletään luonnonvaroilla, joita maapallo ei pysty sitomaan takaisin.

Marinin hallituksen suurimpana päästötavoitteena Suomessa on olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä, josta suunta jatkuu hiilinegatiivisuuteen. Hiilineutraalius tarkoittaa sitä, että vapautetaan ilmastoon ainoastaan niin paljon hiilidioksidia, joka pystytään sitomaan takaisin maaperään ja metsiin. Tavoite pyritään saavuttamaan kunnianhimoisella ilmastopolitiikalla, jossa hallitus päättää tarvittavat toimet, joilla tavoitteet saavutetaan. Yhdeksi tavoitteeksi hiilineutraaliuden saavuttamiseksi on asetettu asumisen ja rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen, joka saavutetaan älykkäillä ohjausjärjestelmillä mitkä tukevat joustavaa ja tarpeenmukaista energiankäyttöä. (3.1 Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi 2020.) Valtion kestävä kehityksen yksikön Motivan sivuilla kerrotaan, että Suomen kokonaisenergiankulutuksesta 26 % on peräisin rakennusten lämmitysenergiasta (Energian loppukäyttö 2020). Suomessa ja maailmalla on siis paljon potentiaalia muuttaa rakennusten lämmittämistä ympäristöystävällisempään suuntaan ja yksi näistä keinoista on maalämpöpumppu. Jos maalämpöpumppuun pystytään tuottamaan kulutettava sähköenergia uusiutuvilla luonnonvaroilla, voidaan sitä ajatella uusiutuvaksi lämmöntuotantomuodoksi. Vaikka sähköenergia olisi tuotettu päästörikkailla polttoaineilla, on maalämpöpumppulla silti 3–4 kertaa pienemmät päästöt tuotettua lämmitysenergiayksikköä kohden verrattuna esimerkiksi suoraan sähkölämmitykseen, jossa hyödynnettäisiin samaa sähköenergian lähdettä.

1.1 Tutkimusasetelma ja tavoitteet

Vaikka maalämmön suurin kasvu on tapahtunut pientaloissa, on maalämpö yleistynyt myös toimisto- ja palvelutaloissa. On odotettavaa, että trendi jatkuu samankaltaisena kiinteistöjen hiilijalanjäljen pienentämiseksi, maalämpöpumpun ollessa useimmiten matalapäästöisempi lämmitysmuoto verrattuna kaukolämpöön tai lämmityskattiloihin. Toimeksiantaja Nuuka Solutions Oy tuottaa suurille kiinteistöille ja kiinteistöportfolioille rakennuksen energiahallintaohjelmistoa,

jolla optimoidaan energiankulutusta ja parannetaan rakennuksien sisäilmaa. Opinnäytetyön tavoite oli selvittää miten maalämpöpumpun prosesseja seurataan, optimoidaan ja ohjataan. Näiden osa-alueiden pohjalta tutkittiin maalämpöpumpun soveltuvuutta ohjelmistopohjaiseen automaattiseen kunnonvalvontajärjestelmään, jossa mitatun tiedon avulla pystytään ennustamaan tulevia huoltotoimenpiteitä ja havaitsemaan optimoinnin tarpeita prosessissa. Työssä tutkittiin millä logiikoilla ja parametreilla voidaan luoda järkeviä hälytyksiä maalämpöpumpun kunnossapitoon. Maalämpöpumpun ohjauksen ja optimoinnin avulla selvitettiin lämpöpumpun ajamista ohjelmistopohjaisesti esimerkiksi tekoälyllä. Työssä analysoitiin mitä maalämpöpumpun prosesseja voidaan ohjata ja millä parametreilla se toimii optimaalisesti. Lisäksi työssä tutustuttiin energiamarkkinoihin ja tutkittiin maalämmön potentiaalia kysyntäjoustossa.

Tutkimuskysymykset olivat:

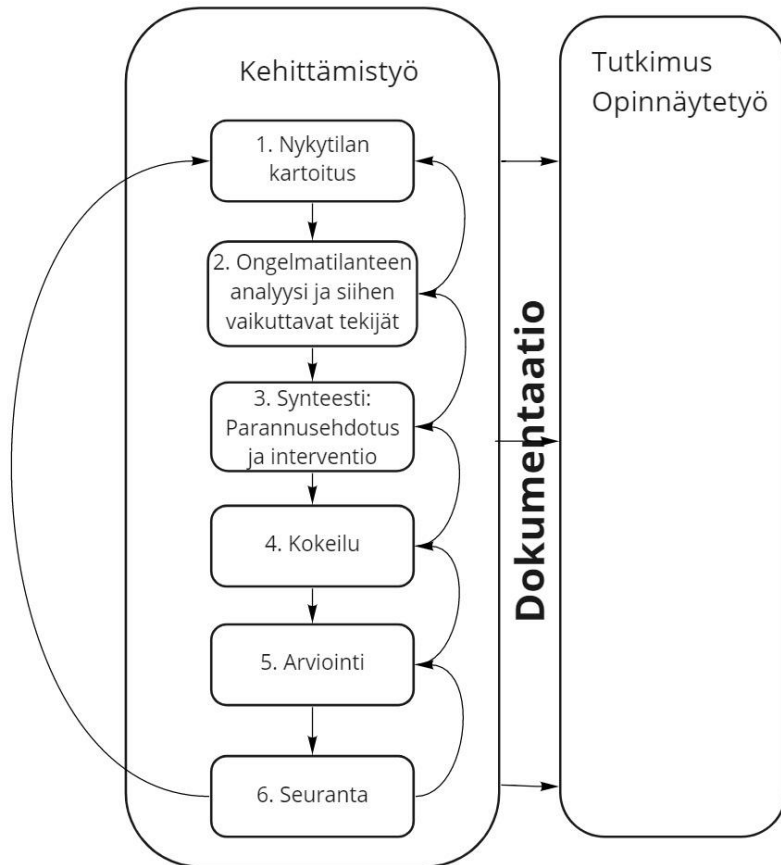
- Miten maalämpöpumpun prosessien mittatiedon avulla voi ennustaa ja havaita maalämpöpumpun vikatilanteita ja huollontarvetta?
- Mikä on maalämpöpumpun potentiaali kysyntäjoustossa?
- Kuinka paljon maalämpöpumpun tehoja pystytään säätämään ilman, että se vaikuttaa merkittävästi sisäilmaolosuhteisiin?
- Onko maalämpöpumppu soveltuva ohjelmistopohjaiseen ajamiseen?

Maalämmön kysynnän kasvaessa toimeksiantajan on tarpeellista varautua myös maalämmön hallintaan tarjoamissaan tuotteissa, joten opinnäytetyössä tutkittiin, miten maalämpöä voi soveltaa toimeksiantajan tuotteisiin ja luoda pohja tuotteiden tuotekehitykselle. Toimeksiantajan tarjoamat tuotteet edustavat kuitenkin kokonaisvaltaisesti kiinteistöjen energiahallinta-alan suuntaa, joten työn hyöty ei ylety ainoastaan toimeksiantajalle, vaan koko alalle. Työn tavoitteena oli luoda sellainen pohja maalämpöpumppuihin liittyvälle tuotekehitystyölle, josta pystytään jatkamaan tuotteiden kehitystä selkein askelein perustellusti. Työ soveltuu pohjaksi maalämpöpumppua tutkiville tahoille ja sen avulla voidaan kehittää kokonaisvaltaisesti maalämpöpumppujen hallintaa eteenpäin.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Työ toteutettiin laadullisena kehittämistyönä. Työssä analysoitiin erilaisten lähteiden, kuten tutkimusartikkeleiden ja muun kirjallisuuden avulla maalämpöpumpun hallintaa, toimintaa ja kysyntäjouaston toteuttamista maalämpöpumpun tehoja säätämällä. Pääsääntöisesti kehittämistöitä toteutetaan, kun ei pyritä yleistämään ja tutkittavasta ilmiöstä on hyvä käsitys. Kanasen (2014) mukaan kehittämistyössä on vain yksi iso kysymys ”Mistä tässä on kyse?”. Vaikkakin tutkittua aiheetta pystytään soveltamaan useimpiin maalämpöpumppuihin, oli aiheiden asettelu itsessään sen luonteinen, että kehittämistutkimus antoi parhaat edellytykset tutkimuksen tekemiselle. Laadullisessa tutkimuksessa tarkoitetaan mitä tahansa tutkimusta, jolla pyritään tuloksiin ilman määrällisiä tai tilastollisia menetelmiä. (Kananen 2014.)

Työ eteni Kanasen (2012) esittämän kehittämistutkimuksen kehittämissyklin vaiheiden mukaisesti, jotka on kuvattu kuviossa 2. Alkuun kartoitettiin toimeksiantajan tilanne maalämpöpumpun hallinnan kanssa ja tehtiin alustava suunnitelma työn tavoitteille ja aihealueille, joita se pitäisi sisällään. Seuraavaksi kehittämistyössä analysointiin ongelmatilanne, joka tässä työssä tarkoitti maalämpöpumppuun liittyvien tuotteiden kehittämistarvetta. Kehittämistarvetta havaittiin monissa eri tuotteissa, joita kaikkia pystyttiin käsittelemään työssä. Kehittämistarpeiden ollessa laajat oli tarpeellista tehdä selkeitä rajauksia, jotka ovat esitettyinä luvussa 1.3. Kanasen kehittämissyklin vaiheissa parannusehdotus ja interventio ovat tämän työn tulokset. Koska toimeksiantajalla ei ole vielä asiakasta, jolla työn tuloksia voitaisiin kokeilla, arvioida ja seurata, se jätettiin myöhempien kehittämistöiden aiheeksi sekä toimeksiantajan vastuulle. Dokumentaatiota työssä toteutettiin alusta loppuun kaikissa työn vaiheissa.



miro

Kuvio 2. Kehittämistutkimuksen kehittämissyklin vaiheet (Kananen 2012)

Tutkimuksen aineisto koostettiin sisällönanalyysinä. Se on yleinen tapa laadullisissa tutkimuksissa aineistonkeruuseen, joka sisältää, tai josta on johdettu lähes kaikki laadullisten tutkimusten aineistonkeruutavat (Tuomi & Sarajärvi 2013). Sisällönanalyysissä pyritään analysoimaan tekstissä olevat merkitykset siten, että siitä löydetään syvimät merkitykset ja siitä pyritään luomaan mahdollisimman tiivis kuvaus ilman, että aineistosta menetetään informaatioarvoa. Tutkimuksessa kerättiin aineistoa tutkimuksista, opinnäytetöistä, artikkeleista, raporteista, oppimateriaaleista sekä maalämpöpumppuja myyvien yritysten sivuilta. Aineistossa pyrittiin mahdollisimman tuoreisiin lähteisiin ja vanhempia lähteitä analysoitiin kriittisesti ottaen huomioon alan kehityksen. Myös maalämpöpumppuja myyvien yritysten informaatiota tuli tarkastella kriittisesti huomioiden yritysten kaupallisen tavoitteen. Analysointi kuitenkin koski pääosin yritysten myytäviä tuotteita, joiden tuotetietojen voidaan olettaa olevan täsmälliset. Kansainvälisiä tutkimuksia hyödynnettiin, mutta niissä huomioitiin maalämpöpumpun toiminnan riippuvuus ilmastoon.

1.3 Rajaukset

Jotta työstä ei tullut liian laaja, oli työ toteutettava alustavana tutkimuksena tulevaisuuden tuotekehitystyölle. Työ rajattiin liikekiinteistöihin, eli käytännön tasolla suuriin ja keskisuuriin rakennuksiin toimeksiantajan asiakaskunnan myötä. Kunnonvalvontahälytysten toteutusta pystytään suunnittelemaan työn tuloksista ja ohjelmistopohjaisen ajamisen soveltuvuus tiedetään. Työssä haluttiin pysyä vahvasti jo olemassa olevien maalämpöpumppujen hallinnan puolella, eikä tekniikkiin toteutuksiin tai maalämpöpumpun tekniikan kehittämiseen otettu kantaa. Työssä myös keskityttiin ainoastaan lämmönkeruupiiriin ja maalämpöpumpun hallintaan. Suurissa kiinteistöissä on usein suhteessa rakennuksen kokoon ainoastaan vähän maapinta-alaa, joten työssä rajattiin vaakatasoinen lämmönkeruupiiri pois ja keskityttiin porakaivoon, joka vie vähän pinta-alaa, sillä lämmönkeruu tehdään maan alla, eikä pinnalla. Lämmönjakojärjestelmien, kuten lämminkäyttövesi- ja lämmitysverkostojen hallinta jätettiin pois siitä syystä, että niiden toteutustavat ovat samankaltaisia lämmönlähteestä riippumatta ja toimeksiantajalla on jo valmiiksi tarpeellinen osaaminen ja kokemus niiden hallintaan. Kysyntäjoustopon reservimarkkinoita käsiteltiin suomen näkökulmasta ja mukaan otettiin ainoastaan taajuuden vakautusreservit FCR-N ja FCR-D, sillä maalämmön säätövoimapotentiaalin vähyys rajaa pois muut reservimarkkinalajit. Mikäli muita reservimarkkinalajeja halutaan kuitenkin jatkossa tutkia, antaa työ myös sille vahvan pohjan, sillä yhteinen tekijä kaikille reservimarkkinoille on potentiaali ajaa maalämpöpumpun tehoja ylös tai alas.

1.4 Toimeksiantaja

Toimeksiantajana tutkimuksella on Nuuka Solutions Oy, joka on SaaS – ohjelmistoyritys, joka tuottaa energiahallintajärjestelmää suurille kiinteistölle ja kiinteistöportfolioille. Nuukan energiahallintajärjestelmään voidaan liittää taloautomaatiikkaa valmistajasta riippumatta ja sitä voidaan yksilöidä asiakkaan tarpeen mukaisesti. Nuukan tuotteita ovat:

- Nuuka Analytics, jolla analysoidaan kiinteistön energiankäyttöä, sisäilmaa sekä rakennuksen energiankäyttöön ja sisäilmaan liittyviä prosesseja. Nuukan visiona on tuottaa rakennuksille parempaa sisäilmaa ja vähentää kiinteistöjen energiankäyttöä.
- Nuuka Diagnostics, joka on automaattinen kunnonvalvontajärjestelmä, jolla pystytään havaitsemaan kiinteistön prosessien epäoptimaalista toimintaa sekä ennustamaan ja havaitsemaan huoltotarpeita.
- Nuuka Optimize, jonka avulla optimoidaan tekoälyyn pohjautuvilla koneoppimismalleilla kiinteistön prosesseja. Optimizen avulla kiinteistön energiankäyttö on tarpeenmukaista ja turha energiankulutus karsitaan sisäilmaolosuhteiden pysyessä hyvänä.

Nuukan visiona on parantaa rakennusten sisäilmaa ja vähentää energiankulutusta, sillä ihmiset viettävät 90 % ajastaan sisäilmassa ja rakennukset tuottavat 40 % maailman päästöistä. Suurin kuorma ympäristölle tulee vanhoista rakennuksista, joissa prosessit eivät toimi optimaalisesti, sillä suomen 1,5 miljoonasta kiinteistöstä 40 % on rakennettu ennen vuotta 1970 ja usein vanhat rakennukset eivät toimi optimaalisesti.

1.5 Työn luotettavuus ja eettisyys

Työssä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä siten, että työ toteutettiin avoimuuden ja rehellisyyden ehdoilla alusta loppuun. Työssä pyrittiin objektiivisuuteen, kuitenkin ymmärtäen miten tutkijan lähtökohdat vaikuttavat lopputulokseen, sillä tutkijan menneisyys vaikuttaa katsontakantaan, jolla tutkimusta lähdetään toteuttamaan. Tutkimuksessa ei käytetty kenenkään henkilökohtaisia tietoja eikä kerätty aineistoa haastattelemalla. Aineistona käytettiin kaikille vapaasti saatavilla olevaa materiaalia siten, että tiedon alkuperä on aina tunnistettavissa.

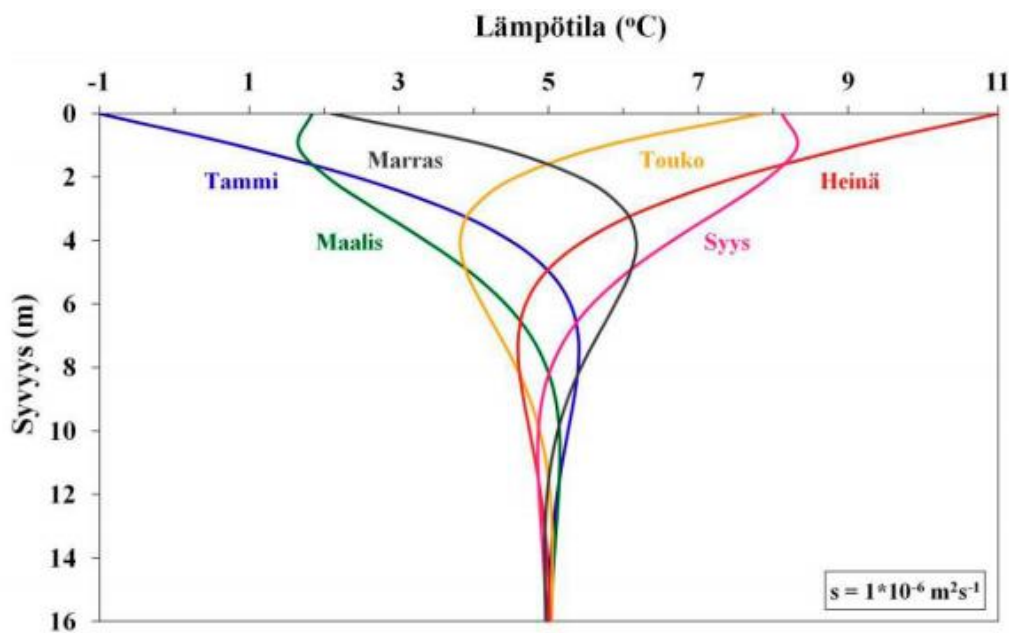
2 Maalämpöpumppu ja lämmönkeräyspiiri

2.1 Maalämpöpumppu yleisesti

Geologian tutkimuskeskuksen tutkijat Ville Lauttamäki ja Jarmo Kallio (2013) perustelevat raportissaan geoenergian käyttöä rakennuskohteissa. Suomessa aurinko- ja geotermistä energiaa täytyy hyödyntää suurelta osin varastoituneena energianmuotona, sillä pohjoisen sijainnin vuoksi ja erityisesti talvella suora aurinkoenergia on vähäistä. Tässä työssä maalämpö on maasta, kalliosta tai vedestä kerättävää auringon varastoimaa sekä maapallon sisältä tulevaa geotermistä lämpöenergiaa. Joissakin yhteyksissä maalämpö-termiä käytetään pelkästään maaperään varastoituneesta aurinkoenergiasta puhuttaessa ja siitä erotetaan geoterminen energia, joka tarkoittaa maapallon sisäisistä reaktioista syntyvää lämpöä. On osoitettu, että 3 % maahan varastoituneesta lämmöstä riittäisi kattamaan lämpöenergian kulutuksemme maalämmöllä. (Lauttamäki ja Kallio 2013.)

Maalämmön vuosihyötysuhde on parhaimmillaan lattialämmityksissä suurissa taloissa. Maalämmön tuottaessa tehokkaimmillaan matalalämpöistä lämmitysenergiaa lattialämmitys tuo suuremman lämmönvaihdon pinta-alan ja on näin hyötysuhteeltaan parempi, sillä lattialämmitysverkostoon ei tarvitse tuottaa niin lämmintä vettä kuin esimerkiksi patteriverkostoon. (Esite- Lämpöä

omasta maasta n.d.; Juvonen 2009.) Kuitenkin uudiskohteissa voi myös patteriverkoston hyötysuhde olla lattialämmitystä vastaava. Vuosilämpökerroin vaihtelee kohdekohtaisesti maalämmöllä 2,5 ja 3,5 välillä, eli maalämmön avulla saadaan lämpöenergiaa hyödynnettäväksi noin kolminkertainen määrä pumpun kuluttamasta sähköenergiasta. Kuviosta 3 nähdään, että talvikuukausina maaperä on useimmiten muutaman asteen lämpimämpää verrattuna ulkolämpötilaan ja mitä syvemmälle mennään, lämpötilan vuodenaikaisvaihtelu katoaa. Kun ylitetään 15 metrin syvyys, aurinkoenergia alkaa muuttumaan geotermiseksi energiaksi, eli se siirtyy maapallon sisältä pintaa kohti. (Lauttamäki ja Kallio 2013.)



Kuvio 3. Teoreettinen lämpötila-syvyyskäyrä (Lauttamäki ja Kallio 2013).

2.2 Maalämpöpumpun toiminta

Maalämpöpumppu toimii yksinkertaistettuna siten, että lämmönkeruupiiristä tuodaan maasta lämpöenergiaa lämpöpumpulle. Prosessi on esitettyä kuviossa 4. Lämpöpumpussa keruupiirin neste höyrystää lämpöpumpun sisällä kulkevan kylmäaineen, jonka jälkeen kylmäaineen paine nostetaan kompressorissa, josta seuraa lämmön nousu jopa 100 celsiusasteeseen. Lämmitetty kylmäaine luovuttaa lämpöenergiaansa lämmitys- ja lämminkäyttövesipiireille, jolloin kylmäaine lauhuu ja sen paine lasketaan paisuntaventtiilin avulla ja kylmäaine tuodaan uudestaan höyrystettäväksi lämmönkeruupiirin lämmöllä. (Soomro 2020; Hakala & Kaappola 2007.)

2.3 Lämmönkeruupiiri

Lämpö kerätään maaperästä joko porakaivolla tai pintamaahan asennetusta pitkästä vaakaputkesta. Myös veteen asennettu keruupiiri on mahdollista toteuttaa. Vaakaputket tarvitsevat paljon tilaa, joten ne ovat pihalla varustetuille pientaloille oiva ratkaisu, mutta liikekiinteistöille porakaivo on vähäisen tonttipinta-alan vuoksi usein parempi ratkaisu. Porakaivolla pystytään myös toteuttamaan viilennystä maaperän ollessa kesällä ulkolämpötilaa kylmempi, joka on suuri etu erityisesti liikekiinteistöissä. (Lauttamäki ja Kallio 2013.) Liikekiinteistöjen vähäisen tontti pinta-alan vuoksi keskitytään tässä työssä porakaivojen rakenteeseen poissulkien vaakaputkiston sekä veteen asennetun keruupiirin.

Porakaivo on useimmiten 150–300 m syvä, mutta mikäli lämmitystehoa tarvitsee enemmän, on mahdollista porata myös syvemmälle. Toisaalta voi olla kannattavampaa porata useampia rinnakkaisia porakaivoja, mutta tällöin vierekkäisten porakaivojen välit tulee olla jopa 15 metriä. (Maaperä lämmön lähteenä n.d.)

Liitteessä 1 on esitetty porakaivon rakenne. Kaivo on eristetty noin 6 metrin syvyyteen asti, jolla suojellaan pohjavettä, jotta sinne ei päädy maanpinnalta vesiä ja irtoaineita (J. Juvonen 2009). Lämmönkeruuputket jatkuvat koko porakaivon pituudeltaan kaivon alas asti ja niiden halkaisijasta ja kohteen muista olosuhteista riippuen koko kaivon halkaisija vaihtelee 105 ja 165 mm välillä. Keruuputkissa kiertää jäätymätöntä nestettä, joka on useimmiten teollisuusalkoholin ja veden liuos, kaliumformaattiliuos, kaliumkarbonaattiliuos tai betaiinipohjainen liuos (Lappi 2013.)

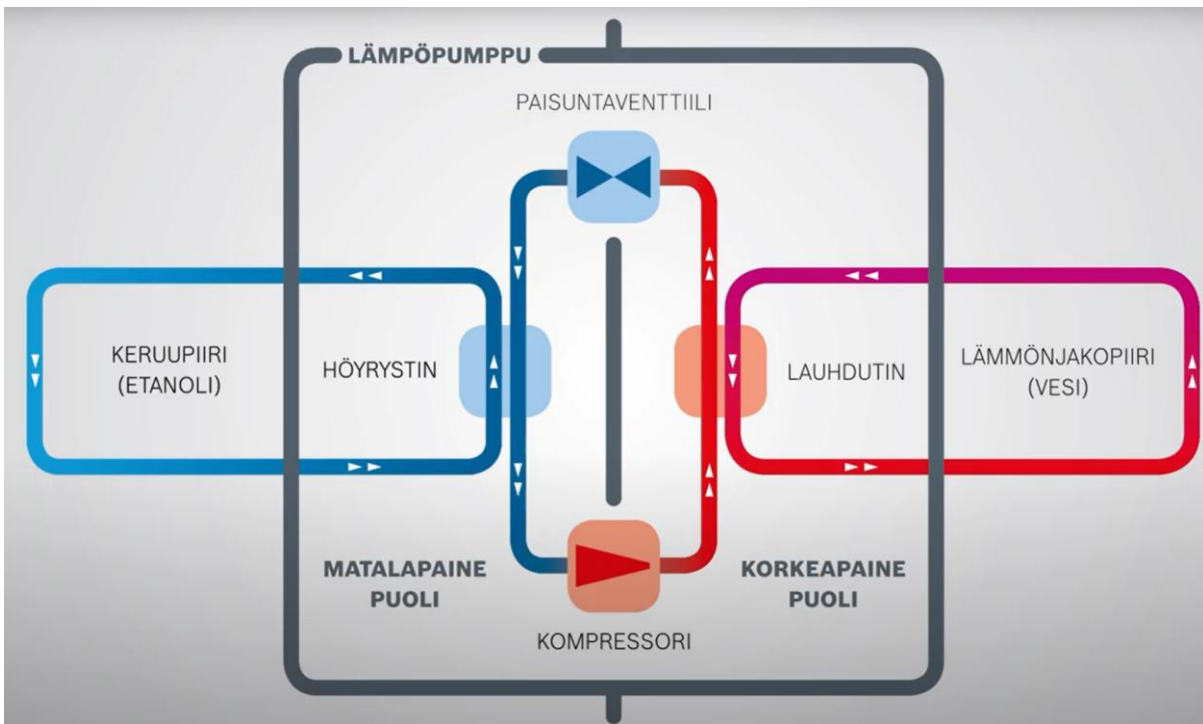
2.4 Lämpöpumpun toiminta

Maalämpöpumpun toimintaan liittyen on syytä avata kaksi tärkeää termiä, joiden avulla hahmotetaan maalämpöpumpun kierron vaiheita:

- Matalapainepuoli: Kylmäaineen kierron puoli, jossa kylmäaine höyrystetään ja johon keruupiirin lämpö tuodaan.
- Korkeapainepuoli: Kylmäaineen kierron puoli, jossa kylmäaineen höyry on puristettu kaasaan ja lämpötila on noussut, jotta pystytään luovuttamaan lämpöenergiaa lämmönjakopiirin vedelle.

Kuviossa 4 kuvataan maalämpöpumpun prosessin kiertoa, jossa kylmäaine kulkee läpi maalämpöpumpun komponenttien. Matalapainepuolella maalämpöpumpun höyrystimeen tuodaan lämmönkeruupiirillä kerättyä lämpöenergiaa. Höyrystimellä lämmönkeruupiirin nesteen lämpötila tippuu muutamia asteita ja luovutettu lämpöenergia käytetään kylmäaineen höyrystämiseen. Kylmäaineen höyrystymistä voi ajatella samalla tavalla kuin veden höyrystymistä. Ero on aineiden kiehumispisteessä. Kun vettä höyrystetään, se tarvitsee olosuhteista riippuen noin 100 celsius asteen lämpötilan, kun kylmäaineen höyrystyminen vaatii esimerkiksi -5 celsiusasteen lämpötilan (Lappi 2013). Höyrystynyt neste on mainio lämmönsiirrin, joten kylmäaineen alhainen höyrystymislämpötila tuo suuria etuja lämpöpumpun toiminnassa. Kaasuuntunut kylmäaine viedään kompressorille, jossa sen painetta nostetaan. Kaasuuntuneen kylmäaineen lämpötila ei vielä ennen kompressoria riitä lämmitysprosesseihin, mutta paineistettaessa kaasu puristetaan pienempään tilavuuteen pitäen saman energiamäärän, sen lämpötila nousee. Tavoitelämpötila riippuen kiinteistön lämmitystavasta on noin 70–100 °C. Paineistettu kaasu luovuttaa lauhduttimessa lämpöenergiaa lämmönjakopiirille, jossa lämmitetty lämmönjakopiirin neste luovuttaa lämpöenergiaa lämmityspiirille ja lämpimään käyttövedeen. Lauhduttimessa kylmäaine muuttuu jälleen nesteeksi ja sen paine laskeaan paisuntaventtiilin kautta, jossa sen lämpötila laskee uudelleen lähtötilaan. Prosessi alkaa paisuntaventtiilin jälkeen uudelleen ja kylmäaine on valmis höyrystettäväksi uudestaan lämmönkeruupiirin luovuttamalla lämpöenergialla (Lämpöpumpun asennus- ja käyttöohje 2019). Eri

valmistajien lämpöpumppujen prosesseissa voi olla hieman erilaisia arvoja tai vaiheita, mutta kylmäprosessin pääperiaate on aina sama.



Kuvio 4. Maalämpöpumppu (Bosch Lämpötekniikka 2017)

Maalämpöpumpussa sähköenergiaa kuluttaa kompressori ja muut apulaitteet kuten pumput, energiamittarit sekä mahdolliset lämmitysvastukset. Lämpöpumpun tehokkuus ilmaistaan lämpökertoimena, eli kuinka paljon lämpöpumppu tuottaa lämmitysenergiaa kulutettua sähköenergiaa kohtaan. Lopun lämpöenergian maalämpöpumppu ottaa lämmönkeruupiirillä maaperästä. Maalämpöpumpun lämpökerroin COP lasketaan kaavalla 1:

$$COP = \frac{Q_h}{W} \quad (1)$$

Q_h tuotettu lämpöenergia, [kWh]

W kulutettu sähköenergia, [kWh]

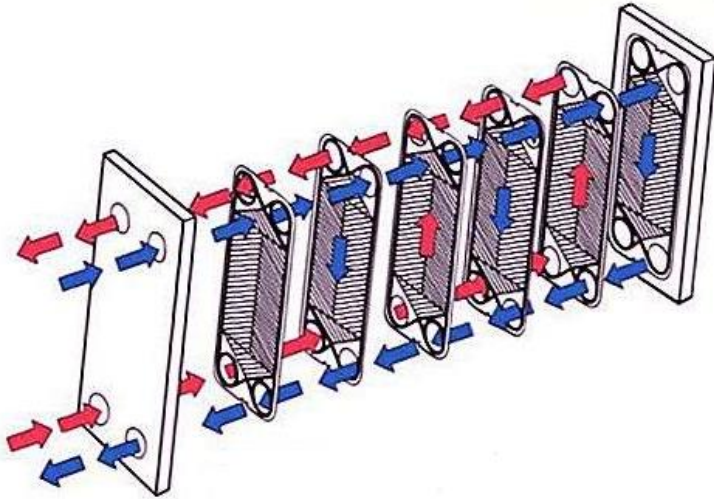
2.4.1 Kompressori

Kompressori on tärkein, monimutkaisin ja hintavin yksittäinen osa maalämpöpumpun toimintaa. Ilman kompressoria kylmäaine ei voi puristua kasaan ja nostattaa lämpötilaa, jonka avulla luovutetaan lämpöenergiaa rakennuksen käyttöön. Maalämpöpumpun kompressoreina käytetään invertti- eli taajuusmuuttajaohjattuja kompressoreita sekä perinteisiä kompressoreja, jotka ovat koko ajan päällä tasaisella nopeudella, eli niiden nopeutta voidaan säädellä ainoastaan päälle/pois valinnoilla. Nykyään inverttiohjatut kompressorit ovat huomattavasti kannattavampia niiden mahdollistaman energiankulutuksen säätelyn ja laajan käyttöalueen vuoksi. Maalämpöpumpun kompressorit ovat hermeettisiä kompressoreita, jotka koostuvat sähkömoottorista ja kompressorista (Kylmäkompressorit hermeettisestä avokompressoriin n.d). Maalämpöpumpuissa käytetään yleisesti ruuvikompressoreita sekä Scroll- kompressoreita (kierukkakompressoreita). Vanhat mäntäkompressorit ovat jo tekniikkansa puolesta harvinaisia. (Inverttiohjattu kompressori n.d)

Ruuvikompressorin tekniikka perustuu kahteen spiraaliruuviin, jotka pyörivät vastakkaiseen suuntaan siten, että kylmäaineen paine nousee ja tilavuus pienenee kylmäaineen höyryn kulkeutuessa eteenpäin. Mäntäkompressoriin vertailtaessa ruuvikompressorin hankintahinta on suurempi, mutta se on kannattava hankinta luotettavuuden ja laajan käyttöalueen myötä. Kompressorin tehokas käyttöalue on noin 150–200 W:sta ylöspäin. Scroll- kompressorit muistuttavat muuten ruuvikompressoreita, mutta puristus tapahtuu kierukoiden välissä, joista toinen pyörii ja toinen pysyy paikoillaan. (Kylmäkompressorit hermeettisestä avokompressoriin n.d.)

2.4.2 Höyrystin ja Lauhdutin

Höyrystin ja lauhdutin ovat lähes poikkeuksetta levylämmönsiirtimiä, jonka rakenne on kuvattu kuviossa 5. Levylämmönsiirtimessä kylmät ja kuumat nesteet kulkevat useiden levyjen läpi putkissa vastavirtaperiaatteella, jolloin höyrystimessä matalapainepuolella oleva kylmäaine höyrystyy ja tulistuu. Lauhduttimessa taas korkeapainepuolelta tuleva höyry tiivistyy ja lauhdutin luovuttaa lämpöenergian lämmönjakopiirille. Levylämmönsiirtimen energiatehokkuus suhteessa pieneen kokoonsa on erinomainen. Levylämmönsiirrintä valittaessa käyttäjän tulee ottaa huomioon tarvittava teho, kulutus ja käyttölämpötila. (Räisä 2013.)

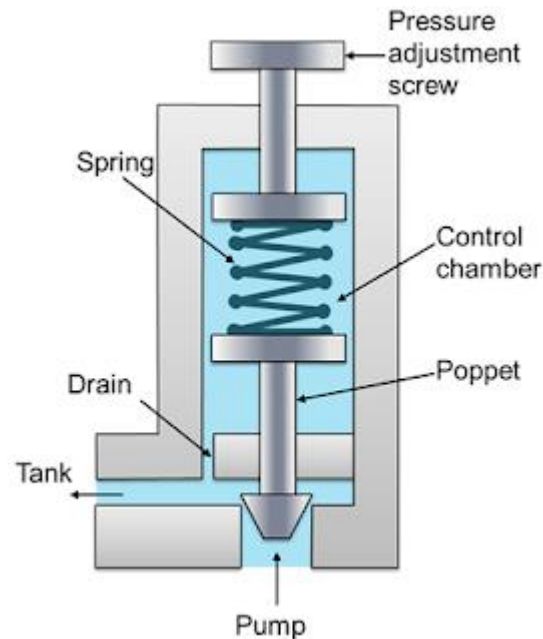


Kuvio 5. Levylämmönsiirtimen rakenne (Levylämmönvaihdin: toimintaperiaate: Lamelliset lämmönvaihtimet: laite n.d.)

2.4.3 Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiili, jonka rakenne on kuvattu kuviossa 7, on kompressorin kanssa toinen komponentti, joka erottaa korkea- ja matalapainepuolet toisistaan. Kylmäainekierrossa paisuntaventtiiliin tulee jäähtynyt höyrylauhde seos luovutettuaan osan lämpöenergiastaan rakennuksen käyttöön korkeapainepuolen lämmönvaihtimella. Paisuntaventtiilin avulla pidetään höyrystimessä tulistuneen höyryn lämpötila vakiona, jolla estetään kompressoriin joutuva kylmäaineneste. Sitä seurataan mittaamalla höyrystimen jälkeistä kylmäaineen lämpötilaa sekä painetta ja reagoimalla siihen. Paisuntaventtiilejä on sekä sähkökäyttöisiä, että mekaanisia. Elektroninen paisuntaventtiili reagoi nopeammin olosuhteiden muutoksiin, mutta tulistuksen, eli nesteen saapumislämpötilan ja

höyrystyslämpötilan erotuksen tietyssä paineessa, on oltava 4–6 C asteen tasolla, jotta sitä voidaan käyttää. Mekaaninen paisuntaventtiili on hieman hitaampi reagoimaan muutoksiin. (Räisä 2013.)



Kuvio 6. Paisuntaventtiilin yksinkertaistettu rakenne (Divedi n.d.)

3 Maalämpöpumpun seuranta

Tässä kappaleessa käsitellään maalämpöpumpun ja sen lämmönkeruupiirin seuranta ja mittauksia. Maalämpöpumpun prosesseja tulee mitata, jotta niiden toimivuus voidaan varmistaa. Mittauksista voi huomata, mikäli maalämpöpumpussa on käynnissä jokin vikatila tai tulevaisuudessa oleva huoltotoimenpiteen tarve. Kun prosessit eivät toimi optimaalisesti, se näkyy mitatussa datassa, mikäli mittaukset ovat hyvin suunniteltu. Valmistaja suunnittelee mittapisteet prosessikohtaisesti arvioiden anturoinnin tarvetta kussakin prosessin vaiheessa. Seuranta on tärkeää, jotta pystytään suunnittelemaan maalämpöpumpuille suunnattua automatisoitua diagnosointia. Pääosin prosesseissa mitataan nesteiden lämpötilaa ja painetta.

Tässä opinnäytetyössä ei tarkastella yksittäisen maalämpöpumpun toimintaa vaan tarkastellaan mittapisteitä ja maalämpöpumpun seuranta yleisellä tasolla. Automaattista kunnonvalvontaa

työn perustella toteutettaessa on otettava huomioon, että eri valmistajien maalämpöpumpuissa on todennäköisesti hieman erilaiset mittausten ja seurannan toteutukset.

3.1 Lämmönkeruupiirin mittaukset

Lämmönkeruupiiristä mitataan ensisijaisesti tulo ja menolämpötilaa sekä keruupiirin staattista painetta. Menolämpötila kertoo minkä lämpöisenä keruupiirin neste lähtee keräämään lämpöenergiaa, eli kierron vaiheessa se on jo luovuttanut lämpöenergiansa lämmönvaihtimella lämpöpumpulle, ja lähtee uudestaan kiertoon ottamaan maan lämpöenergiaa talteen. Tulolämpötila on lämmön keränneen nesteen lämpötila. Näiden kahden mittauksen lämpötilaeron avulla pystytään määrittämään keruupiirin luovuttama lämpöenergian määrä lämmönvaihtimelle. Luovutettu lämpöenergia lasketaan kaavalla 2:

$$\theta = q_m c \Delta T \quad (2)$$

θ	lämmönvaihtimen vastaanottama lämpöenergia, [kWh]
c	aineen ominaislämpökapasiteetti, [J/(kg*°C)]
ΔT	nesteen lämpötilan muutos [°C]
q_m	aineen massavirta, [kg/s]

Toinen tärkeä mitattava suure lämmönkeruupiirissä on lämmönkeruunesteen paine. Paine määrittää miten neste liikkuu keruupiirissä ja sen avulla voidaan havaita, mikäli keruupiiriin kertyy ilmaa tai siellä on vuotoja. Paineen tarkastelu on ympäristön puolesta tärkeää, sillä lämmönkeruupiirin nestettä ei tule päästää maaperään, jossa se voi aiheuttaa vahinkoa (Rohner 2008). Usein lämmönkeruupiirin minimipaineena pidetään 0,6 Bar, mutta hyvä paine on yli yksi Bar (Fakta 79: Näin huollat maalämpö- tai vesi-ilmalämpöpumppua itse 2017).

3.2 Maalämpöpumpun mittaukset

Maalämpöpumpun matalapainepuolella kylmäainesteen lämpötila ja paine putoaa paisunta-venttiilin jälkeen. Venttiilin jälkeen neste höyrystyy ja tulistuu lämmönkeruupiirin lämmönvaihtimen siirtämällä lämpöenergialla. Tulistuneen höyryn paine ja lämpötila nostetaan kompressorilla, jonka läpi höyry kulkeutuu korkeapainepuolelle. Tässä prosessin osassa on tärkeää mitata paineita

ja lämpötiloja kylmäaineen käydessä läpi olomuodonmuutoksia, jotta havaitaan mikäli nämä eivät toimi optimaalisesti.

Paisuntaventtiili mittaa höyrystimen jälkeistä lämpötilaa ja painetta, joiden avulla se pitää tulistetavan nesteen lämpötilan oikeana. Niitä harvoin pystyy hyödyntämään erillisinä mittapisteinä, sillä ne ovat pääosin paisuntaventtiilin sisäisiä mittauksia. Muuten matalapainepuolella mitataan sinne tulevaa ja sieltä lähtevää nesteen lämpötilaa. Myös painemittauksia on olemassa, mutta niitä ei ole aina suunniteltu osaksi maalämpöpumppua. (Toivanen 2019.)

Myös korkeapainepuolella mitataan saapuvaa ja lähtevää kylmäaineen lämpötilaa sekä painetta. Mikäli maalämpöpumpulla on useampi lämmönvaihdin, mitataan jokaisen lämmönvaihtimen lämpötiloja. Ideaalitapauksissa matala- ja korkeapainepuolien paineita mitataan, minkä avulla ymmärretään enemmän kompressorin ja paisuntaventtiilin toiminnasta. On myös mahdollista, että maalämpöpumpun virtauksia mitataan. (Lubofsky 2010; Toivanen 2019.)

Maalämpöpumpun toimivuuden varmistamiseksi olisi tärkeää tietää virtausmääriä sekä lämpötiloja lämmitysverkoston puolella lämmönvaihtimen molemmin puolin. Niiden avulla lauhduttimen toimintaa pystytään diagnosoimaan tarkemmin. Prosessien mittapisteiden lisäksi maalämpöpumpussa seurataan sen kuluttamaa energiamäärää sekä tuottamaa lämmitysenergiaa, joiden avulla pystytään laskemaan COP-arvo.

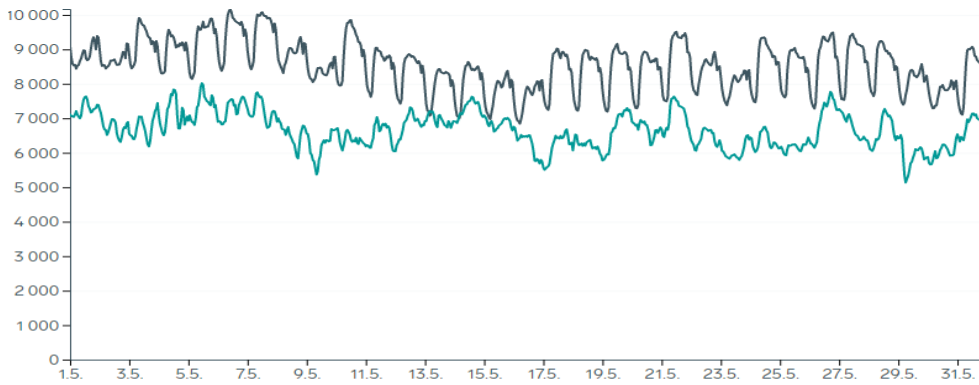
4 Kysyntäjousto

Kysyntäjousto on tärkeä osa tulevaisuuden päästötavoitteita ja sähköverkon tehokkuuden ylläpittoa. Sähköverkkoon tulee syöttää yhtä paljon sähköä, kun sitä käytetään kunakin hetkenä ja mikäli tämä ei toteudu, alkaa sähköverkon taajuus vaihdella heikentäen sähkön laatua. Suomessa sähköverkon taajuus on 50 Hz. Kysyntäjousto on kehitetty tilanteisiin, joissa sähköverkon taajuus muuttuu ja tarvitaan nopeasti kulutus- tai tuotantoreserviä käyttöön.

Tulevaisuuden päästötavoitteiden myötä lauhdevoimaloita on jo lakkautettu ja tulevaisuudessa lakkautetaan lisää. Vaikkakin lauhdevoima on kallista ja päästörikasta, sen etuihin lukeutuu helppo säädeltävyys. Lauhdevoimaloita korvataan ydinvoimalla sekä uusiutuvilla energianlähteillä. Ydinvoiman tällä hetkellä ollessa keskitettyä suuren kokoluokan energiantuotantoa, sen säädeltävyys on huonoa. Tuulivoiman ja aurinkosähkön määrä riippuu suoraan voimaloiden vaikutusalueella olevista sääolosuhteista, joten säätövoimaa ei pystytä tarjoamaan myöskään niillä. (Julin 2019.)

4.1 Sähköverkko

Fingridin ylläpitämien sähkönsiirron kantaverkkojen avulla siirretään tuotettu sähköenergia sähkön tuotantolaitoksilta kulutukseen. Fingrid on suomen sähkönsiirron kantaverkkojen ylläpitäjä ja kehittäjä, joka toimii monopoliasemassa suomessa. Sähkö ei ole pysyvää energiaa ja sähköverkon ominaisuuksiin ei kuulu sähkön varastoiminen, joten sähköä tulee tuottaa yhtä paljon kuin sitä käytetään. Markkinoilla ollessa ylituotantoa sähköstä sähköverkon taajuus nousee normaalista 50 hertsistä ylöspäin. Kun taas sähköä kulutetaan enemmän kuin sitä tuotetaan, sähköverkon taajuus laskee. Tämä aiheuttaa ongelmia erityisesti uusiutuvan energian kanssa. Tuulienergian tai aurinkoenergian määrää ei pystytä säätämään, joten sähköverkon taajuutta joudutaan tasaamaan joko säätelämällä kulutusta tai muuta sähköntuotantomuotoa. Fossiilisilla polttoaineilla rakentuneen ja vielä vahvasti energiamurroksen keskellä olevan yhteiskunnan ei ole mahdollisuutta päästörajoitusten myötä rajoittaa uusiutuvaa sähköntuotantoa, joten tuulivoiman tai aurinkoenergian ylitarjonnan aikaan ei ole vaihtoehto pudottaa tarkoituksenmukaisesti tehoja, jotta sähköverkon taajuus pysyy hyvänä. Tällöin sähköverkon taajuutta täytyy korjata muualta. Sähkön ylitarjonnan aikaan sen käyttöä voidaan suunnata sellaisiin käyttötarkoituksiin, jossa sähkönkäytön ajankohdalla ei ole niin väliä. Kuviossa 7 nähdään Suomen sähkönkulutuksen ja sähkön tuotannon suhde. Sähköä ei pystytä Suomessa tuottamaan yhtä paljon kuin sitä käytetään, joten tämä tuotannon puute joudutaan ostamaan muualta, useimmiten Ruotsista tai muista pohjoismaista. Oma tuotantoa tai tuontisähkön määrää ei pystytä muuttamaan kovinkaan nopeasti, joten yllättävien kuluspiikkien tai sähkön ylitarjonnan aikaan tarvitaan nopeaa reserviä sähköverkkoon. (Reservit ja säätösähkö n.d.)



Kuvaaja	Minimi	Maksimi	Keskiarvo
● Sähkön kulutus	6842	10171	8544 MWh/h
● Sähkön tuotanto	5136	8018	6658 MWh/h

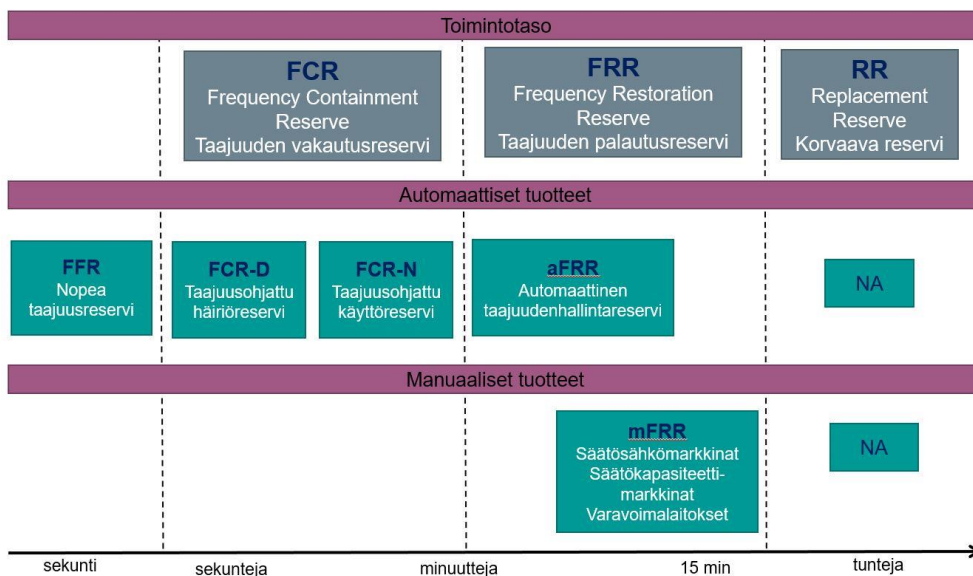
Kuvio 7. Sähkön kulutuksen ja tuotannon suhde toukokuussa 2021 (Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito n.d.)

4.1.1 Inertia

Inertiaalla tarkoitetaan fysiikassa muutosten vastustamista ja sähköverkon inertiaalla tarkoitetaan sähköverkossa olevaa liike-energiaa, joka on sitoutunut voimalaitoksissa sekä tehtaissa olevien koneiden pyörimisliikkeen liike-energiaan. Tämä sähköverkon inertia hidastaa sähköverkon taajuuden muutosta, eli mitä enemmän inertiaa, sitä hitaammin sähkönkulutuksen ja tuotannon muutokset muuttavat sähköverkon taajuutta. Kuten kulutuksen säätelyssä, myös inertiaassa lauhdevoimalla on etunsa, sillä lauhdevoimaa tuotetaan pyörivällä generaattorilla, joka tuottaa inertiaa sähköverkkoon. Uusiutuvilla energiamuodoilla ei ole vastaavanlaista pyörivää massaa energiantuotannossa. Inertian pienentyessä sähköverkon taajuuden muutoksiin pitää vastata nopeammin muutoksilla sähkön kulutuksessa tai tuotannossa. (Leinonen 2018).

4.2 Reservimarkkinat

Suomen sähköverkkoja hallitsevan Fingridin mukaan reservimarkkinoilla tarkoitetaan sitä sähkönsäätöpotentiaalia, joka saadaan käyttöön sähköverkon taajuuden muuttuessa. Reservejä ovat voimalaitokset ja kulutuskohteet, joilla sähkön tuotantoa ja kulutusta hallitaan. Reservimarkkinat jaotellaan niiden käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri ryhmään, jotka ovat esitettyinä kuviossa 8: taajuuden vakautusreservi, taajuuden palautusreservi ja korvaava reservi. (Reservit ja säätösähkö n.d.)



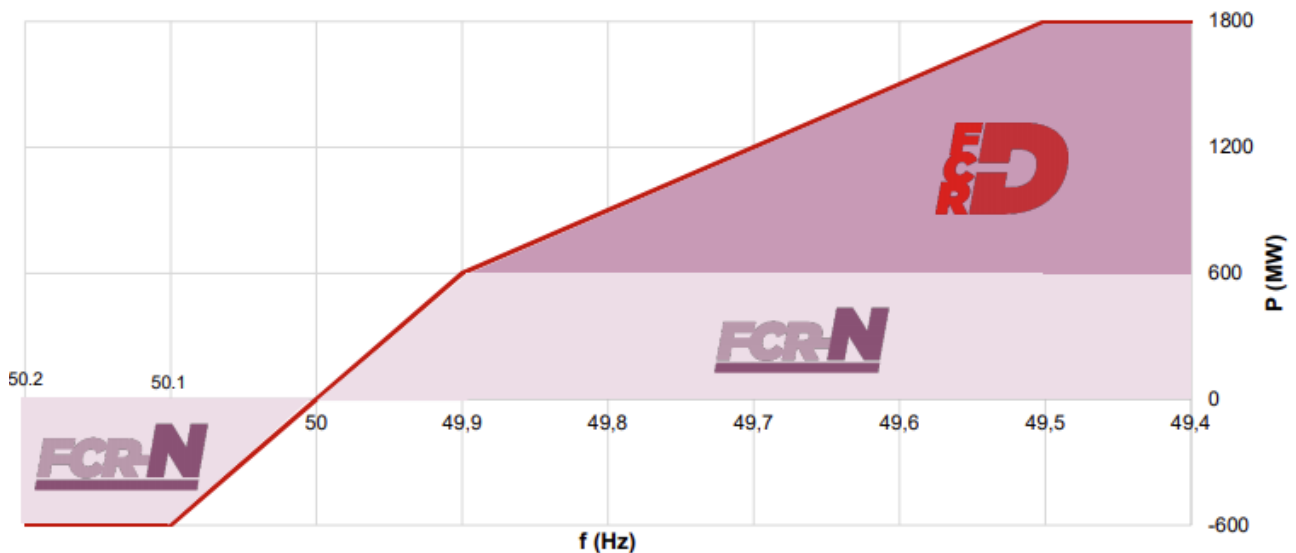
Kuvio 8. Eri reservimarkkinajit (Reservit ja säätösähkö n.d.)

Nopea taajuusreservi (FFR)

Nopea taajuusreservi on reservilajeista nopein aktivoitumaan. Sitä voidaan hyödyntää sekunnissa ja se reagoi pieneen inertiaan. Nopean taajuusreservin määrä riippuu sähköjärjestelmässä olevan inertia määräst, joten sen hankinta on hyvin satunnaista. Inertia on pienintä lämpiminä kuukausina, kun lämmitystarve on pienimmillään, joten nopean taajuusreservin tarve painottuu kesäkuukausille.

Taajuusohjattu käyttö (FCR-N) - ja häiriöreservi (FCR-D)

Taajuusohjattu häiriöreservi on automaattisesti aktivoituva päätehoreservi yhdessä taajuusohjatun käyttöreservin kanssa. Niiden aktivoitumisen nopeus suhteessa taajuuteen on kuvattu kuviossa 9. Taajuusohjatussa käyttöreservissä tehonsäätöä tulee toteuttaa molempiin suuntiin, eli markkinoille osallistuttavan on pystyttävä vähentämään sekä lisäämään kulutusta tarvittaessa, kun taas taajuusohjattu häiriöreservi on jaoteltu erillisiin ylös ja alas-säätö tuotteisiin. Taajuusohjattuun käyttöreserviin voi osallista 0,1 MW säätökuormalla ja taajuusohjattuun häiriöreserviin 1 MW säätökuormalla. (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi n.d.)



Kuvio 9. FCR:n aktivoituminen taajuuden funktiona (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2018)

Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)

Automaattinen taajuudenhallintareservi pyrkii palauttamaan sähköverkon taajuuden 50 Hz nimellisarvoon. Siihen voi osallistua 5 MW säätövoimalla. Reserviä hankitaan tuntimarkkinoilta ja muista Pohjoismaista. (Automaattinen taajuudenhallintareservi n.d)

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat sekä varavoimalaitokset (mFRR)

Säätösähkömarkkinoita pidetään yllä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Markkinoita hyödynnetään sekä häiriö, että normaalitilanteissa tasapainon hallitsemiseksi. Säätökapasiteettimarkkinoilla pyritään varmistamaan, että Fingridillä on tarvittava määrä säätövoimaa myös varavoimalaitosten huolto- ja keskeytystilanteissa. (Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat n.d).

Fingrid ylläpitää omia varavoimalaitoksia (953 MW Säätöpotentiaalia), sekä vuokraa pitkäaikaisilla käyttöoikeussopimuksilla muilta toimijoilta varavoimalaitoksia (301 MW Säätöpotentiaalia). Näitä voimalaitoksia ei käytetä kaupalliseen sähköntuotantoon vaan ainoastaan häiriö ja optimointitilanteiden hoitoon. Useimmat varavoimalaitokset toimivat polttoöljyllä. (Varavoimalaitokset n.d).

Taulukossa 1 esitetään eri reservimarkkinajien tekniset vaatimukset.

Taulukko 1. Reservimarkkinajien tekniset vaatimukset (Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi n.d, Nopea taajuusreservi n.d, Automaattinen taajuudenhallintareservi n.d)

	SÄÄDON VÄHIMMÄISKOKO	AKTIVOITUMISAIKA	MUUTA
TAAJUUSOHJATTU KÄYTTÖRESERVI	0,1 MW	3min ± 0,1 Hz askelmaisella tai lineaarisella taajuusmuutoksella	Kuollut alue max ± 0,01 Hz
TAAJUUSOHJATTU HÄIRIÖRESERVI YLÖS	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 %, askelmaisella taajuusmuutoksella 49,9 Hz:stä 49,5 Hz:iin	
TAAJUUSOHJATTU HÄIRIÖRESERVI ALAS	1 MW	5 s / 50 % 30 s / 100 % askelmaisella taajuusmuutoksella 50,1 Hz:stä 50,5 Hz:iin	
NOPEA TAAJUUSRESERVI	-	1,3 s	Aktivointitaajuus 49,7 Hz
	-	1,0 s	Aktivointitaajuus 49,6 Hz
	-	0,7 s	Aktivointitaajuus 49,5 Hz
AUTOMAATTINEN TAAJUUDENHALLINTARESERVI	5 MW	5 min	

4.3 Maalämpö kysyntäjoustossa

Tässä opinnäytetyössä keskitytään taajuuden vakautusreserveihin, eli FCR-D ja FCR-N reserveihin, sillä niiden teknisinä vaatimuksina on 0,1 MW (FCR-N) ja 1 MW (FCR-D) säätövoimaa. Muut reservimarkkinat ovat teknisiltä vaatimuksiltaan sellaisia, jotka eivät sovi maalämpöpumpun ja kiinteistöjen tarjoamaan säätövoimaan, sillä niiden tehojen (MW) minimiehdot ovat liian suuria ja niillä on selkeästi pienempi tuottopotentiaali.

Maalämpöpumpun ottotehot ovat suurissakin kiinteistöissä usein alle 30 kW, jolla ei yksin pystytä tarjoamaan kokonaisuudessaan säätöreserviä, mutta sitä voidaan käyttää osana muun rakennuksen sekä suuren kiinteistöportfolion tai energiayhtiöiden säätövoimaa. Kuitenkin reservilajeille yhteistä maalämpöpumpun tarjoamaan säätövoimaan on se, kuinka paljon maalämpöpumpun tehoja pystytään säätämään ilman, että kiinteistöjen käyttäjät huomaavat sisäilmaolosuhteissa merkittäviä eroja. Huonojen sisäilmaolosuhteiden mukana voi tulla paljon muita kustannuksia ja terveyshaittoja käyttäjille, joten säätövoimaa tarjotaan ainoastaan siten, että sisäilmaolosuhteet pysyvät hyvinä.

4.4 Kysyntäjoustopuotot

4.4.1 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi

Kapasiteettikorvaus taajuusohjattuun käyttöreserviin osallistumisesta Fingridiltä on vuosimarkkinoilla 14 €/ MWh. Sovittu säätökapasiteetti on toimitettava ja mikäli sitä ei pystytä toimittamaan, maksaa reservinhaltija Fingridille 14 €/ MWh sovittua kapasiteettia. (Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosisopimus 2018.)

Kapasiteettikorvauksen lisäksi Fingrid korvaa kulutetun sähkön energiakorvauksen ylös säädöstä mitatun energiankulutuksen perusteella (Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosisopimus 2018).

Taajuusohjatun häiriöreservin kapasiteettikorvaus on vuosimarkkinoilla 2,8 €/ MWh. Kuten taajuusohjatussa käyttöreservissäkin on reservinhaltija vastuullinen toimittamaan sovittu säätökapasiteetti ja mikäli sitä ei pystytä toimittamaan on reservinhaltija velvollinen maksamaan Fingridille korvauksia 2,8 €/ MWh. (Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosisopimus 2018.)

5 Automaattinen vikatilanteiden diagnosointi

Nuuka Solutions Oy:n energiahallintajärjestelmään voidaan kerätä reaaliaikaista trendidataa kaikista talotekniikan mitatuista prosesseista riippumatta automaation valmistajasta. Data jää käyttäjän hyödynnettäväksi sekä sitä voidaan analysoida koko mittaus historian ajalta. Sovelluspohjainen vikadiagnosointi eroaa automaatiojärjestelmän vikadiagnosoinnista siten, että sovelluspohjaisesti voidaan analysoida mittapisteiden historiadataa ja esimerkiksi seurata matalapainepuolen lämmönvaihtimen luovuttaman lämpötilan tai sen paineen muutosta. Usein prosessien omat automaatiojärjestelmät antavat ainoastaan mittapisteiden ylä- tai alaraja hälytyksiä, mikä rajoittaa vikatilanteiden diagnosointia merkittävästi. Etenkin huollontarpeen ennustaminen jää automaation omalla vikatilanteiden seurannalla minimaaliseksi.

Vikatilanteiden diagnosointiin tarvitsee mitattavien suureiden lisäksi ymmärtää maalämpöpumpun ja talotekniikan prosesseja, jotta pystytään luomaan oikeanlaiset parametrit, joilla hälytyksiä luodaan. Sovelluspohjaisen vikadiagnosoinnin etuina on se, että dataa pystytään tarkastelemaan pidemmällä aikavälillä. Esimerkiksi maalämmön keruupiirin painetta voidaan tarkastella vuorokauden ajalta ja jos keruupiirin paine laskee yksittäisenä hetkenä alle raja-arvon, siitä ei tarvitse hälyttää, sillä se todennäköisesti ei ole vikatilanne. Jos taas vuorokauden arvoista esimerkiksi yli 10 % on alle raja-arvon, keruupiirissä on korjattavaa. Nuukan automaattinen vikatilanteiden diagnosointi osaa myös mitattujen suureiden mukaan antaa todennäköisiä korjausehdotuksia.

Mitattua tietoa kerätään Nuukan energiahallintajärjestelmään minuutin välein, jotta pystytään havaitsemaan nopeatkin muutokset prosessissa. Ilmanvaihto ja lämmitysprosesseja seurattaessa ja ohjattaessa on havaittu sisäilmaolosuhteiden ja prosessien seurantaan minuutin väli riittäväksi. Vikatilanteiden diagnosointiin väli voisi olla pidempikin, mutta prosessien ajamiseen kysyntäjoustopuun tai tekoälyn ehdoilla minuutin väli on optimaalinen.

Lähtökohtaisesti kaikki vikatilanteet maalämpöpumpussa ja sen keräyspiirissä johtavat siihen, että lämmönjakeluverkosto ei saa tarpeeksi lämpöä ja sisäilmaolosuhteet heikentyvät tai maalämpöpumppu kuluttaa energiaa liian paljon suhteessa lämmitystarpeeseen.

5.1 Energiatohokkuuden seuranta

Maalämpöpumpun COP lämpökerrointa seurattaessa tarvitsemme mittapisteiksi maalämpöpumpun kuluttaman sähköenergian sekä sen tuottaman lämpöenergian. Laskentatapa on esitetty kaavassa

1. COP-lukua seurattaessa tulee huomioida vuodenaikaisvaihtelu maalämpöpumpun hyötysuhteessa.

Lauhduttimen teho voidaan laskea kaavalla 3 tarkasteltuna siten, kuinka paljon se luovuttaa lämpöenergiaa lämmityspiireille. Lauhduttimen tehoa seuraamalla voidaan määrittää sen energiatehokas toiminta ja arvioida kuntoa. Mikäli lauhduttimen teho laskee huomattavasti lämmitystarpeeseen nähden tarkasteltuna, sen kunto olisi tarkistettava.

$$\theta_L = q_v c_p \rho (T_2 - T_1) \quad (3)$$

θ_L	lauhduttimen lämpöteho [kW]
q_v	lämmönjakoveden tilavuusvirta [kg/m ³]
c_p	veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
ρ	lämmönjakoveden tiheys [kg/m ³]
T_1	veden lämpötila ennen lauhdutinta [°C]
T_2	veden lämpötila lauhduttimen jälkeen [°C]

Höyrystimen teho voidaan laskea kaavalla 4 tarkasteltuna siten, kuinka paljon lämmönkeruupiiriltä luovutetaan energiaa kylmäaineelle. Höyrystimen tehoa seuraamalla voidaan tarkastella höyrystimen energiatehokkuutta ja arvioida höyrystimen kuntoa. Mikäli höyrystimen teho laskee huomattavasti lämmitystarpeeseen nähden tarkasteltuna, tulisi sen kunto tarkistaa.

$$\theta_H = q_v c_p \rho (T_3 - T_4) \quad (4)$$

θ_L	höyrystimen lämpöteho [kW]
q_v	lämmönkeruunesteen tilavuusvirta [kg/m ³]

c_p	lämmönkeruunesteen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]
ρ	lämmönkeruunesteen tiheys [kg/m ³]
T_1	lämmönkeruunesteen lämpötila ennen höyrystintä [°C]
T_2	lämmönkeruunesteen lämpötila höyrystimen jälkeen [°C]

Lauhduttimen ja höyrystimen tehoista saadaan kuitenkin eniten arvoa tarkastellessa muista diagnostiikoista esille nousseita hälytyksiä. Niiden tehon laskeminen voidaan havaita aina muualla prosessissa, sekä lämmönvaihdinten tehot vaihtelevat niin suuresti, että näille ei tässä työssä suunnitella omia hälytyksiä. Tämän työn avulla sitä voi kuitenkin suunnitella tulevaisuudessa.

5.2 Ohjausvalvonta

Ohjausvalvonnalla tarkastellaan, käynnistyykö maalämpöpumpun toiminta automaation käskyjen mukaisesti. Hälytyksillä huomataan tilanteet, joissa maalämpöpumpun ohjaus on päällä, vaikka käyntitila on pois, ja mikäli automaatio ohjaa maalämpöpumpun kiinni ja maalämpöpumpun käyntitila on edelleen päällä.

Kompressorin toimintatilaa tulisi myös valvoa, jotta se käynnistyy, kun kompressori ohjataan päälle. Mikäli kompressori käy jatkuvasti ilman lupaa, voi sen sisällä esiintyä vuotoja tai matalapainepuolen paine voi olla liian matala.

5.3 Keruupiirin vikatilanteet

Keruupiirin staattista painetta mitattaessa voidaan sen havaita olevan liian matala. Se havaitaan keruupiirin paineen mittauksesta ja seurauksena useimmiten liian pieni virtaus keruupiirissä ja alentuneet lämmönvaihtimen tehot, joten huonelämpötila laskee. Tällöin keruupiirin nesteen määrä tulee tarkistaa ja sen ollessa hyvä voi painetta lisätä.

Keruupiirin pumppu ei toimi. Havaitaan keruupiirin virtausmittauksesta sekä pumpun käyntitilasta. Seurauksena useimmiten liian pieni tai olematon virtaus keruupiirissä ja alentuneet lämmönvaihtimen tehot, joten huonelämpötila laskee. Tällöin on tarkastettava pumpun toiminta.

Mikäli lämmönkeruupiirin virtaus tiedetään, voidaan sen luovuttama lämpöenergian määrä laskea aiemmin esitetyllä kaavalla 2. Luovutettua lämpöenergiaa tai tehoa tarkastellessa voidaan seurata lämmönvaihtimen toimintaa. Lämmönvaihtimen toimintaa voidaan myös seurata tulo ja paluunesteen lämpötilaa seuraamalla, mutta sen avulla ei pystytä tarkastelemaan lämmönvaihdinta yhtä tarkasti.

Keruupiirin lämpötilamittauksille tulee asettaa raja-arvot. Erityisesti lämmönvaihtimelle saapuvan nesteen lämpötilan seuranta on tärkeää, jotta voidaan todeta kerättävän lämpöenergian riittävyys. Mikäli lämpötila on alle suositusten, tulee tarkistaa keruupiirin pumpun toiminta sekä jäteseu­lan puhtaus. Kuten kaikissa mitatuissa suureissa, erityisesti lämpötilamittauksissa ei haluta generoida hälytystä yhdestä raja-arvon ylityksestä vaan hälytykset tulee toteuttaa siten, että tietty prosentti­osuus vuorokauden arvoista ylittää rajat.

5.4 Maalämpöpumpun vikatilanteet

Maalämpöpumpussa voi rikkoutua kompressorin, paisuntaventtiili, lauhtutin tai höyrystin. Erityisesti prosessin lämmönvaihtimilla, eli lauhtuttimella ja höyrystimellä on myös riski siihen, että ne eivät toimi optimaalisesti ja prosessi kuluttaa enemmän sähköenergiaa tietyn lämmitysenergiayksikön tuottamiseksi verrattuna normaaliolosuhteisiin.

5.4.1 Kompressorin

Höyrystimellä tulistus tulee olla tarpeeksi suuri, sillä liian pieni tulistus voi aiheuttaa kompressorille rikkoutumisen päästään liian kosteata höyryä tai jopa nestettä kompressorin (Kaappola, Hirvelä Jokela & Kianta 2011). Erityisesti scroll-kompressorin on herkkä kostealle höyrylle ja se voi rikkoutua aiheuttaen suuret kustannukset kompressorin ollessa kallein yksittäinen komponentti maalämpöpumpussa. Esimerkiksi paineen avulla säädetty hyvä höyrystymislämpötila kylmäaineelle, maalämpöpumpusta riippuen, on -2 °C . Liian alhainen höyrystymislämpötila tai suuri tulistus ei aiheuta akuutteja vikatilanteita, mutta heikentää lämpöpumpun hyötysuhdetta. (Sainio 2015.)

Joskus maalämpöpumpuissa mitataan suoraan kylmäaineen tulistusta, mutta ei aina. Jos näin ei ole ja tiedetään nesteen höyrystymislämpötila ja tulistimen jälkeistä lämpötilaa mitataan, voidaan laskea nesteen tulistus kaavalla 5.

$$T_{\text{ulistus}} = T_t - T_h \quad (5)$$

T_t höyrystimen jälkeinen tulistetun kylmäainehöyryn lämpötila

T_h kylmäaineen höyrystymislämpötila

5.4.2 Lauhdutin

Lauhduttimella lauhtumispaine voi olla liian korkea, mikä voi aiheuttaa liian korkea jäähdytysveden lämpötila tai liian vähäinen lämmityspiirin veden virtaama. Lauhtumispaine voi olla myös liian matala, mikä voi johtua päinvastaisista ongelmista kuin liian korkealla lauhtumispaineella, eli lämmityspiirin veden virtaama voi olla liian suuri tai lämpötila liian matala. (Kaappola, Hirvelä Jokela & Kianta 2011.)

Lauhtumispaine ja lämpötila voi huojua, tarkoittaen, että se huojuu asetetun lauhtumispaineen ylä- ja alapuolella. Tällöin todennäköisesti paisuntaventtiilin toiminta ei ole optimaalista ja sen tulistus voi olla liian pieni.

5.4.3 Huonelämpötila

Huonelämpötilaa seuraamalla varmistetaan sisäilmaolosuhteiden laadusta ja pystytään reagoimaan tilanteisiin, jossa sisäilman lämpötila tippuu tai nousee yli asetettujen rajojen. Mikäli lämmityskaudella huonelämpötila on liian alhainen, voi vika olla lämmönvaihtimien tehossa. Lämmönvaihtimien lämmitysteho tulisi tarkastaa energiahallintajärjestelmään kaavoilla 3 ja 4 luoduilla tehopisteillä. Myös kompressorin tehot voivat olla liian alhaiset, mikäli huonelämpötilan tavoitearvoa ei saavuteta.

Mikäli jäähdytyskaudella huonelämpötila on liian suuri ja maalämpöpumpulla pystytään viilentämään, tulee tarkistaa lämmönvaihtimien jäähdytysteho kaavojen 3 ja 4 mukaan luoduilla tehopisteillä. Mikäli keruupiirin ja kylmäainekierron välisellä lämmönvaihtimella on liian pieni jäähdytysteho, vikana on todennäköisesti jäteseulan likaisuus.

5.5 Vikatilanteiden perusteella luotavat Diagnostiikat

Tässä luvussa esitellään vikatilanteiden perusteella luodut diagnostiikka hälytykset. Jokaiselle diagnostiikka hälytykselle määritetään käyttötarkoitus, eli selvennetään mikä ongelma sillä pyritään löytämään. Taulukossa 2 esitetään myös vikatilanteen seuraukset eli mitä tapahtuu, jos kyseinen vikatilanne on käynnissä ja todennäköiset korjaustoimenpiteet vikatilanteille.

Taulukko 1. Vikatilanteet ja korjausehdotukset

DIAGNOSTIIKAN NIMI	KÄYTTÖTARKOITUS	SEURAUKSET	KORJausehdotukset
MAALÄMPÖPUMPPU EI KÄYNNISTY OHJAUKSEN MUKAAN	Havaitsee, jos maalämpöpumppu ohjataan käyntiin, mutta maalämpöpumppu ei käynnisty	Maalämpöpumppu ei lämmitä, vaikka on lämmitystarvetta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista pumpun ohjaus 2. Tarkista automatiikan hälytykset
MAALÄMPÖPUMPPU EI SAMMU OHJAUKSEN MUKAAN	Havaitsee, jos maalämpöpumpun ohjaus on pois, mutta maalämpöpumppu on käynnissä	Maalämpöpumppu lämmitää ilman lämmitystarvetta -> Energiatehokkuus laskee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista pumpun ohjaus 2. Tarkista automatiikan hälytykset
KOMPRESSORI EI KÄYNNISTY OHJAUKSEN MUKAAN	Havaitsee, jos kompressori ohjataan käyntiin, mutta kompressori ei käynnisty	Maalämpöpumppu ei lämmitä, vaikka on lämmitystarvetta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista ohjauspiirin sulakkeet ja ryhmäsulakkeet 2. Tarkista, että lauhtumis-paine ei ole liian korkea
KOMPRESSORI EI SAMMU OHJAUKSEN MUKAAN	Havaitsee, jos kompressorin ohjaus on pois, mutta kompressori on käynnissä	Lämmittää ilman lämmitystarvetta	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista kompressorin ohjausautomaatiikka 2. Tarkista matalapainepuolen paineet ja mikäli paine on korkea, tarkasta vuotaako kompressori

MAALÄMPÖPUMPUN COP-LUVUN VALVONTA	Havaitsee, jos maalämpöpumpun COP- luku laskee liian matalaksi	Maalämpöpumppu kuluttaa liikaa energiaa. Kertoo huollontarpeesta.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista lauhduttimen ja höyrystimen lämpötehot lasketuilla apupisteillä 2. Tarkista jätesihdit 3. Tarkista keruupiirin paine
LÄMMÖNKERUUPIIRIN STAATTINEN PAINEN ON LIIAN MATALA	Havaitsee, jos lämmönkeruupiirin paine laskee liian matalaksi	Lämmönkeruupiirin energiatehokkuus heikkenee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista vuodot 2. Tarkista maapiirin pumpun toiminta 3. Lisää keruupiirin painetta
LÄMMÖNKERUUPIIRIN STAATTINEN PAINEN ON LIIAN KORKEA	Havaitsee, jos lämmönkeruupiirin paine nousee liian korkeaksi	Pumpun energiatehokkuus heikkenee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista lämmönkeruupiirin pumpun toiminta 2. Tarkista lämmönkeruunesteen määrä
HÖYRYSTIMESSÄ TULISTUS ON LIIAN MATALA	Havaitsee, jos kylmäainehöyryn tulistus on liian matala	Saattaa päästää liian kosteata höyryä kompressoriin ja kompressori voi rikkoutua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista höyrystimen tehot 2. Nosta tulistusta
HÖYRYSTIMESSÄ TULISTUS ON LIIAN KORKEA	Havaitsee jos kylmäainehöyry tulistuu liian kuumaksi	Energiatehokkuus heikkenee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Laske tulistusta
TULISTUS HUOJU	Havaitsee, jos kylmäainetulistus ei tasaannu		<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista tulistus, jos liian pieni nosta tulistusta 2. Tarkista, onko paisuntaventtiilin suutin liian suuri
LAUHTUMISPAINEN ON LIIAN KORKEA	Havaitsee, jos lauhduttimeen menevän kylmäainehöyryn paine on liian korkea	Lauhdutin luovuttaa liian vähän lämpöenergiaa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista paisuntaventtiilin toiminta 2. Tarkista, että lämmityspiirin veden virtaama ei ole liian suuri 3. Tarkista, että lämmityspiirin veden lämpötila ei ole liian korkea
LAUHTUMISPAINEN ON LIIAN MATALA	Havaitsee, jos lauhduttimeen menevän kylmäainehöyryn paine on liian matala	Lauhdutin ei toimi tehokkaasti	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista paisuntaventtiilin toiminta 2. Tarkista, että lämmityspiirin veden virtaama ei ole liian pieni 3. Tarkista, että lämmityspiirin veden lämpötila ei ole liian matala

LAUHTUMISPAIN HUOJU	Havaitsee, jos lauhtumiseen menevän kylmäainehöyryn paine huojuu optimaalisen paineen ylä- ja alapuolella	Energiatohokkuus heikkenee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista paisuntaventtiilin toiminta 2. Tarkista, että paisuntaventtiiliä ei ole mitoitettu liian suurille virtauksille
LAUHTUMISLÄMPÖTILA HUOJU	Havaitsee, jos lauhtumiseen menevän kylmäainehöyryn lämpötila huojuu optimaalisen paineen ylä- ja alapuolella	Energiatohokkuus heikkenee	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista paisuntaventtiilin toiminta 2. Tarkista, että paisuntaventtiiliä ei ole mitoitettu liian suurille virtauksille
LÄMMÖNJAKOVERKOSTON MENOVEDEN LÄMPÖTILA ON LIIAN ALHAINEN LÄMMITYSKAUDELLA	Havaitsee, jos lämmönjakoverkoston menoveden lämpötila laskee liian matalaksi lämmityskaudella	Sisäilmaolosuhteet heikentyvät	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista lämpötilasensorin sijainti 2. Tarkista lämmönjakoverkoston menoveden lämpötilan säädöt 3. Tarkista lämmönjakoverkoston menoveden virtaus 4. Tarkista lauhtumisen teho 5. Tarkista höyrytimen teho
LÄMMÖNJAKOVERKOSTON MENOVEDEN LÄMPÖTILA ON LIIAN KORKEA JÄÄHDYTYSKAUDELLA	Havaitsee, jos lämmönjakoverkoston menoveden lämpötila nousee liian korkeaksi jäähdytyskaudella, mikäli kohteessa on jäähdytyspat- teri	Sisäilmaolosuhteet heikentyvät	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tarkista lämpötilasensorin sijainti 2. Tarkista lämmönjakoverkoston menoveden lämpötilan säädöt 3. Tarkista lämmönjakoverkoston menoveden virtaus

6 Maalämpöpumpun sovelluspohjaisen ajamisen edellytykset

Maalämpöpumpun sovelluspohjaisella ajamisella siirretään maalämpöpumpun ajaminen automaatiolta verkkopohjaisille sovelluksille. Ajaminen eroaa siinä, että automaatio on logiikkapohjainen tapa kontrolloida maalämpöpumppua, kun sovelluspohjaisesti ajamisella ei ole käytännössä rajoitteita. Sovelluspohjaista ajamista voidaan soveltaa esimerkiksi kysyntäjoustopuolella tai koneoppimismallien kehittämisessä, jolloin se on parhaimmillaan tarpeenmukaisen lämmityksen tuottamisessa.

6.1 Maalämpöpumpun ohjaaminen

Maalämpöpumppua voidaan ohjata kahdella tavalla sovelluspohjaisesti. Yksinkertaisimmillaan maalämpöpumpun tehoa voidaan säädellä tarpeenmukaisuuden mukaan. Tällä toteutetaan tilojen tarpeenmukaista lämmitystä ja optimoidaan ylimääräisen lämpöenergian käyttö maksimoiden sisäilman laadun. Toinen tapa ohjata maalämpöpumppua, on ottaa hallinta kaikista prosessin osista. Tällöin pystytään maksimoimaan maalämpöpumpun hyötysuhde, ja etenkin kompressorin, höyrystimen ja lauhduttimen toiminta tehokkaimmalla mahdollisella tavalla. Näistä ensimmäinen on huomattavasti yksinkertaisempi, sillä tällöin ohjataan ainoastaan lämpötehoa, kun jälkimmäisessä tavassa on otettava huomioon moninkertainen määrä asioita.

Kaikki maalämpöpumpun ohjaukset pyrkivät pitämään lämmitysverkoston ja lämpimän käyttövesiverkoston menoveden lämpötilan tasaisena ja riittävänä. Mikäli ohjaukset eivät ole optimaalisia, voi se johtaa tilanteeseen, jossa menolämpötilat vaihtelevat, ovat liian suuria tai liian pieniä. Mikäli komponenteissa on vikaa, ne todennäköisesti paikallistetaan aiemmin esitellyn vikadiagnosoinnin avulla, mutta ongelmia voi olla myös automaatiossa ja sen optimaalisessa toiminnassa.

Maalämpöpumpun sovelluspohjaisia ohjauksia suunniteltaessa suunnittelua vaikeuttaa eri toimijoiden erilaiset ohjauksen tekniset toteutukset. Vanhoissa lämpöpumpuissa ei välttämättä ole rakennettuja sisäisiä ohjauspisteitä ja uusissakin maalämpöpumpuissa on monenlaisia erilaisia variaatioita. (Salonen 2017.) Vaikka maalämpöpumppujen ohjauksissa on erilaisia variaatioita, niitä useimmiten yhdistää säätöpisteet, joiden arvojen avulla ohjataan prosesseja.

6.2 Säätopisteet

Maalämpöpumpussa tärkein säätopiste, millä prosesseja voidaan ohjata ja millä voidaan toteuttaa tarpeenmukaista tilojen lämmitystä, on lämmitysverkoston menoveden lämpötila. Kun tilojen lämmitys tapahtuu tarpeenmukaisesti, kulutetaan vain se määrä lämpöenergiaa, mikä on tarpeellista. Usein automaation säätökäyrien perusteella tehtävä lämmitys ei tapahdu sisäilmaolosuhteiden mukaan, vaan ulkolämpötilan, joka johtaa tilanteeseen, jossa ei oteta huomioon tilojen sisäistä lämpökuormaa. Kun lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa säädellään sisälämpötilan mukaan, ei lämmitetä sisätiloja turhaan.

Höyrystimessä tapahtuva tulistus on maalämpöpumpun sisäisen prosessin tärkeä säätopiste. Sen avulla määritetään matalapainepuolelta lähtevän höyryn lämpötila. Jos tulistus on liian suuri, se heikentää maalämpöpumpun hyötysuhdetta, mutta jos se on liian matala kompressoriin voi joutua liian kosteaa höyryä.

Kylmäainenesteen paine matalapainepuolella määrittää kylmäaineen höyrystymispisteen ja tulistuksen. Sitä säädellään paisuntaventtiilin toiminnan mukaan. Mikäli paisuntaventtiili on elektroninen, sitä voidaan säätää etäkäytöllä, mutta mekaanista paisuntaventtiiliä tarvitsee säätää fyysisesti. (Vihjeitä asentajille – kylmäinfo 2008.)

Kompressori luo korkean paineen, jotta kylmäaine pystyy luovuttamaan lauhduttimelle lämpöenergiaa. Tämä paine määrittää kuinka lämmintä kylmäaine on ja kuinka paljon lauhdutin sitä pystyy hyödyntämään.

6.3 Ohjauspisteet

Säätopisteet ja ohjauspisteet ovat yhteydessä siten, että ohjauspisteillä toteutetaan säätopisteiden pyynnöt. Esimerkiksi, mikäli korkeapainepuolen paine laskee liian matalaksi, säätopiste kertoo tavoitearvon, johon päästään tehostamalla kompressorin toimintaa kompressorin ohjauspisteellä.

Ohjauspisteiden avulla ohjataan esimerkiksi pumppuja tai puhaltimia käyntiin ja oikeaan nopeuteen. Lämmönkeruupiirissä sekä lämmönjakoverkostossa toimivat pumput, jotka pumppaavat nestettä prosessissa eteenpäin. Näillä pumpuilla määritetään virtausmäärät. Lisäksi kompressorin moottorin tehoa ohjataan ohjauspisteillä.

6.4 Ennusteiden hyödyntäminen

Asunnon lämmitystarve määrittyy pitkälti ulkolämpötilan mukaan. Lattialämmityksen tai lämmityspatterin lämpötila ei muutu hetkessä, joten mikäli sisälämpötila on jo ehtinyt laskemaan ulkolämpötilan laskun myötä, on lämmitys silloin myöhässä. Mikäli taas sisälämpötila on ehtinyt nousemaan ulkolämpötilan nousun myötä, on kulutettu turhaan lämpöenergiaa tilojen lämmittämiseen.

Ilmatieteenlaitos tarjoaa Suomessa lämpötilaennusteita ja etenkin lähituntien ennusteet ovat hyvinkin paikkansapitäviä muutamien tuntien päähän. Näiden ennusteiden avulla pystytään ennustamaan lämmitystarvetta tuleville tunneille ja reagoimaan siihen ennen kuin muutos näkyy sisälämpötilassa.

Toinen huomioitava asia ennusteiden hyödyntämisessä on suora auringonpaiste asuntoon ikkunoiden läpi. Ilmatieteenlaitos tarjoaa ennusteita pilvisyydestä ja auringon suunta voidaan määrittää kunakin hetkenä. Olosuhteiden ja ikkunoiden ilmansuunnan avulla on mahdollista luoda malli, joka ennustaa auringonpaisteen vaikutusta huonelämpötilaan.

7 Kysyntäjousto ja maalämpöpumppu

7.1 Maalämpöpumppujen tehot

Maalämmön kysyntäjoustopotentiaalin määrittää se, kuinka paljon maalämpöpumpun tehoja pystytään säätämään ylös tai alas, niin, että sisäilmaolosuhteet eivät kärsi merkittävästi. Eniten sähkötehoa maalämpöpumpuissa kuluttaa kompressorin sähkömoottori. Lisäksi maalämpöpumpun otosähkö koostuu lauhdepumpusta, lämmönjakopumpun sähkömoottoreista ja lisälämmityksessä tarvittavista vastuksista. Syrjäsalon (2013), totesi Tampereen ammattikorkeakoulun maalämpölaitteiston kompressorin tehon olevan 2,8 kW ja maapiirin kiertovesipumpun tehon olevan 0,55 kW.

Esimerkiksi Oilon Group Oy:n tuotteista suurille kiinteistöille suunnattujen maalämpöpumppujen lämmitysteho on maksimissaan noin 100kW, jossa ottoteho on noin 20–25 kW. Ottoteho usein vastaakin noin 25 % - 30 % maalämpöpumpun lämmitystehosta. Kuitenkaan maalämpöpumpun sisäisiä kuormia ei voi muuttaa suhteessa toisiin, vaan tehon säätö tehdään kontrolloimalla koko maalämpöpumpun ottotehoa.

7.1.1 Maalämpöpumpun tehojen säätö

Maalämpöpumppu yksinään pystyy parhaimmillaan yli -25 °C ulkolämpötilassa pudottamaan kaikki lämmitystehot pois, mutta tällöin on erityisen tärkeää tietää, miten sisälämpötila kehittyy, jotta sisäilmaolosuhteet eivät kärsi. FCR-N markkinoilla on usein tilanteita, joissa annetaan lyhytaikaista säätövoimaa, esimerkiksi tunnin ajalle, jolloin kaikki tehot pystytään pudottamaan pois. FCR-D markkinoilla taas on tyypillistä tarjota pitkäaikaista säätövoimaa, esimerkiksi 4 tunnin ajan. Mitä pidemmälle ajalle reservinhaltija tarjoaa säätövoimaa, sitä vähemmän sitä voi maalämpöpumpulla tarjota ottaen huomioon sisälämpötilan kehittymisen. FCR-N reservimarkkinoilla tulee myös huomioida se, että tehoja tulisi pystyä säätämään sekä ylös, että alas.

Maalämpöpumpuissa oleva lämminvesivaraaja ja sen sähkövastus kuitenkin tuovat suurempaa säätövaraa tehojen lisäämiseen. Käyttöveden lämmittäminen ei tarvitse yhtä tasaista lämpötehoa kuin rakennuksen lämmittäminen. Lämmintä käyttövettä voidaan lämmittää ennalta tai sen lämmittämistä voidaan viivästyttää myöhempisiin hetkiin. Kun maalämpöpumpun sähkötehoa käytetään myös lämminvesivaraajan veden lämmittämiseen, pystytään täyttämään tehon hyödyntämään helpommin.

7.2 Kuormien aggregointi

Kuormien aggregointi tarkoittaa sitä, että yhdistetään monen rakennuksen säätövoima tavoitteena saada suuri yksittäinen säätökuorma reservimarkkinoille. Aggregointia voi toteuttaa joko suuri kiinteistöomistaja omilla kiinteistöillään tai kuormia voidaan yhdistää monen toimijan osalta. (Känsälä & Hammar 2018.) Usein yksittäisen rakennuksen säätökuorma on liian pieni tehovaatimuksiltaan, joten kuormien aggregoinnilla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja reservimarkkinoilla. Luoma (2015), havaitsi jopa kuuden ilmanvaihtokoneen pudottamisen osatehoilleen 40 %:n maksimista, tuottavan ainoastaan 18–20 kW säätökuormaa. Tämä kuorma yhdessä maalämpöpumpun

kanssa ei riitä edes pienimmän tehovaatimuksen omaavalle FCR-N markkinalle, jossa vaaditaan vähintään 100 kW kuorma.

7.3 Rakennuksen sisälämpötilan lasku pudotettaessa lämmitystehoja

Kysyntäjoustossa yksi merkittävimmistä asioista on potentiaali säätötehon tarjoamiseen siten, että sisäilmaolosuhteet eivät aiheuta merkittävää haittaa rakennuksen käyttäjälle. Mikäli rakennuksen lämmitys lopetetaan kokonaan, voidaan sen sisätilan lämpötilan lasku määrittää teoreettisesti esimerkiksi kiinteistöille VTT:n tutkimusraportin (Airaksinen 2013) ja Ympäristöministeriön Energiatodistusoppaassa ilmaistujen lämpökapasiteetin ja maksimi lämmöntarpeen avulla. Salonen (2017) on käyttänyt vastaavaa laskentatapaa pienikiinteistöille diplomityössään. Laskennassa on käytetty keskiarvallisesti päteviä lähtöarvoja, joita voi käyttää parhaiten yleistämiseen ottaen huomioon toimiesiintajan keskimääräisen asiakkaan, joka omistaa liikekiinteistöjä. Käytännössä kuitenkin rakennuksen lämpötilan lasku ei toteudu täysin laskennallisesti, sillä esimerkiksi ovien ja ikkunoiden avaaminen vaikuttaa lämpötilan pudotukseen. Taulukoissa 3, 4 ja 5 on esitetty tarvittavat lähtötiedot lämpötilan trendikäyrän laskemiseen.

Taulukko 2. Toimistorakennuksien lämpökapasiteetti (Lehtinen 2018)

Rakennetyyppi	Esimerkkirakenteita (US on ulkoseinä, VS väliseinä, VP välipohja, YP yläpohja ja AP on alapohja)	$C_{rak\ omin}$ Wh/(m ² K)
Toimistorakennukset		
Kevytrakenteinen	US, VS, VP kevyitä rankarakenteita, AP betoni	70
Keskiraskas	US kevyitä rankarakenteita, VS kevyitä rankarakenteita tai betoni, VP betoni, AP betoni	110
Raskarakenteinen	US betoni, VS harkko tai betoni, VP betoni, AP betoni	160

Taulukko 3. Rakennusten maksimi tehontarve pinta-ala yksikköä kohti (Airaksinen 2013)

RAKENNUSTYYPPI	TILOJEN LÄMMITYSENERGIANKULUTUS (kWh/m^2)	TILOJEN LÄMMITTÄMISEN MAX. TEHONTARVE (W/m^2)
SUURI KIIINTEISTÖ	70,5	32,1
PIENI KIIINTEISTÖ	72	34,2
SUURI MATALAENERGIA KIIINTEISTÖ	27,1	21,5
PIENI MATALAENERGIA KIIINTEISTÖ	27,9	22,4

Taulukko 4. Lähtötiedot toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittymisen laskentaan

TOIMISTORAKENNUKSEN PINTA-ALA	A	500	m^2
LÄMPÖKAPASITEETTI PER PINTA-ALA, KESKIRASKAS TOIMISTORAKENNUS	c_{rak}	110	Wh/m^2 $* K$
MAKSIMI LÄMMÖNTARVE	p	32,10	W/m^2
SISÄLÄMPÖTILA	$T_{sisä}$	22,00	$^{\circ}C$
ULKOLÄMPÖTILA HUIPPUTILANTEESSA	$T_{ulko,max W}$	-25,00	$^{\circ}C$
ULKOLÄMPÖTILA 50% LÄMMITYSTEHTÄVÄSSÄ	$T_{ulko,50\% W}$	-5,00	$^{\circ}C$

Keskiraskaan toimistorakennuksen lämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 6:

$$C = A * c_{rak} \quad (6)$$

C on lämpökapasiteetti ($kWh/m^2 * K$)
 A on rakennuksen pinta-ala (m^2)
 c_{rak} on lämpökapasiteetti pinta-ala yksikköä kohden (Wh/m^2)

Lämpöenergian häviäminen lämmityksen ollessa pois päältä, lasketaan kaavalla 7.

$$P = A * p \quad (7)$$

P Lämmöntarve, eli lämpöenergian häviäminen (kW)
 p Lämmöntarve pinta-ala yksikköä kohti (kW/m^2)

Rakennuksen jäähtymisnopeus ensimmäisellä tunnilla lasketaan kaavalla 8.

$$T_1 = \frac{P}{C} \quad (8)$$

T_1 on rakennuksen jäähtyminen ensimmäisellä tunnilla (°C)

Lämpötilaeron pienennyttyä, jäähtymisnopeus pienenee, joten kaavalla 9 saadaan laskettua jäähtymisnopeus aina seuraaville tunneille.

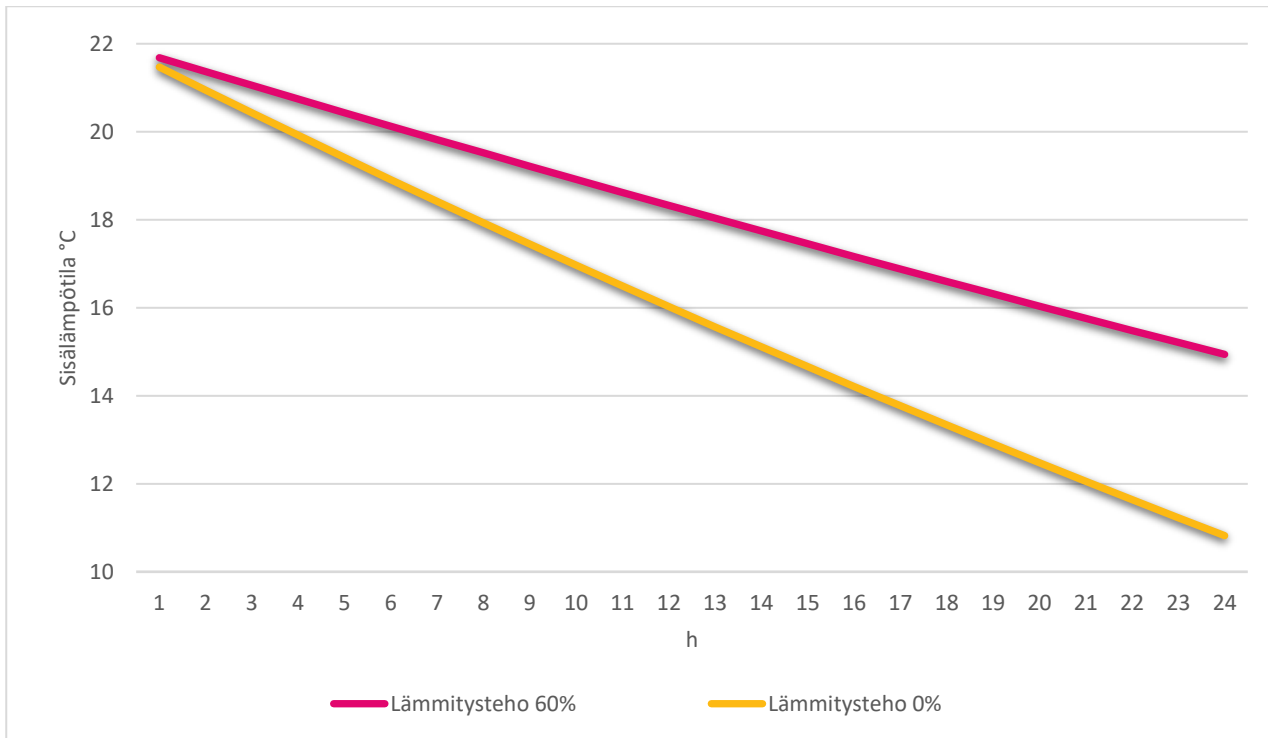
$$T_2 = \frac{\Delta T - T_1}{C} * T_1 \quad (9)$$

T_2 on jäähtymä toisen tunnin jälkeen (°C)
 ΔT on lämpötilaero ulkolämpötilaan (°C)

Kuviossa 10 on laskettuna keskiraskaan toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittyminen tilanteessa, jossa pysäytetään maalämpöpumpun avulla tuotettava lämmitys sekä lasketaan lämmitystehot 60 % lämmöntarpeesta. Lähtötilanteessa sisälämpötilaksi on asetettu 22 °C. Sisälämpötilan kehittyminen on jotakuinkin lineaarista ensimmäisen vuorokauden ajan, minkä jälkeen lämpötilapudotus pienenee, mutta pidempää tarkastelua ei ole tarvetta tehdä, sillä jo alle 18 °C sisälämpötila on merkittävästi alle mukavuuslämpötilan. Liian kylmän sisälämpötilan rajana voidaan pitää 20 °C, jolloin sisäilman vaikutus alkaa olemaan merkittävä. Kuvioista näemme, että mikäli kaikki lämmitysteho pudotetaan pois, kestää sisälämpötilalla pudota alle 20 °C hieman alle 4 tuntia.

Kun säätövoimaa tarjotaan 40 % tehonalennuksella, laskennallisessa esimerkkitilanteessa pystytään tarjoamaan säätövoimaa yli 6 tunnin ajan. Noin 6 tunnin kohdalla lämpötila laskee alle 20°C. Käytännössä lämmittäminen olisi kuitenkin hyvä aloittaa jo aikaisemmin, jotta lämpötila ei ehtisi las-

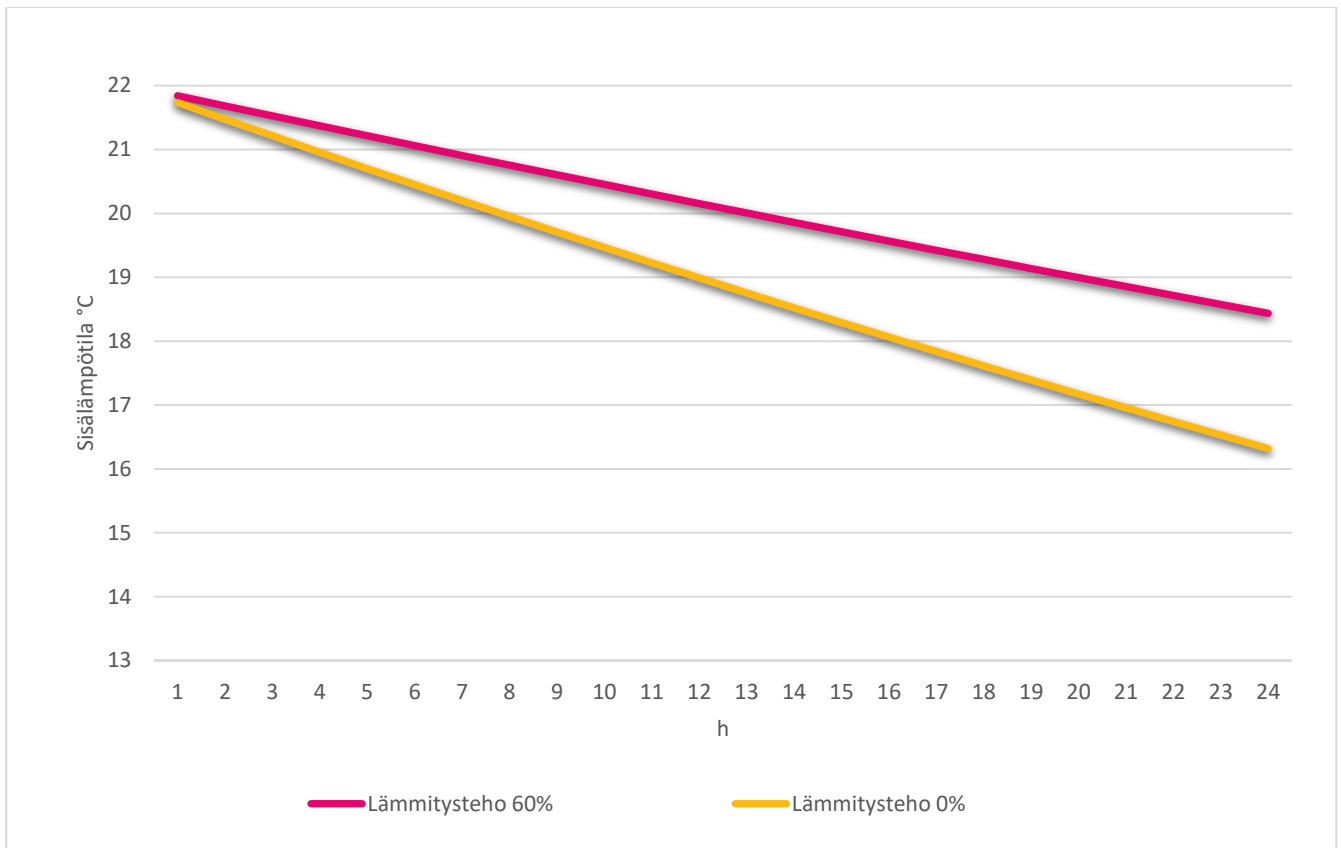
kea lisää, sillä lämmitysteho ei siirry välittömästi huoneisiin vaan lämpimän veden siirtyminen lämmönjakojärjestelmään kestää nopeimmillaankin noin 30min. Toisaalta voidaan ajatella, että sisälämpötilan ollessa 30 min alle 20 °C, se ei tuo merkittävää haittaa käyttäjille.



Kuvio 10. Keskiraskaan toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittyminen -25 °C ulkolämpötilassa 0 % ja 60% lämmitysteholla ensimmäisen vrk aikana

Lämpimämmässä säässä -5 °C lämpötilassa lämmitysteho on noin puolet pienempi verrattuna maksimi lämmitystehtoon. Tällöin myös lämpötilaero sisälämpötilan ja ulkolämpötilan välillä on pienempi, eli sisälämpötila tippuu lähes puolet hitaammin. Kuvioista 11 voimme havaita 0 % lämmitystehtolla sisälämpötilan alittavan 20 °C rajan noin kahdeksannen tunnin kohdalla. Näin pitkällä ajalla lähempi tarkastelu rajataan pois, sillä 8 h aikana toimistorakennuksessa voi tapahtua paljon erilaisia asioita, mitkä vaikuttavat sisälämpötilaan, ja ennustus ei ole niin tarkka. 60 % lämmitystehtolla -5 °C ulkolämpötilassa taas kestää lähes 13 h sisälämpötilan tippumiseen alle 20 °C. Jos taas -

5 °C ulkolämpötilassa lämmitetään rakennusta 60 % tehoilla, pystytään tehoja pitämään alhaalla jo lähes 14 h.



Kuvio 11. Keskiraskaan toimistorakennuksen sisälämpötilan kehittyminen -5 °C ulkolämpötilassa 0 % ja 60% lämmitysteholla ensimmäisen vrk aikana

7.4 Säätövoima tehojen laskemisella

Tärkeä huomioitava asia laskuissa on niiden ohjeellisuus. Lämpökapasiteetti ja lämmitystehontarve ovat taulukkoarvoja ja 500 m² toimistorakennus on hypoteettinen. Lisäksi rakenteiden perusteella valitut lämpökapasiteetti ja lämmitystehontarve voivat vaihdella erilaisissa rakennusteknisissä ratkaisuissa. Mikäli rakennus ei varaa yhtä hyvin lämpöä, sisälämpötila tippuu nopeammin. Mikäli taas rakennuksessa on paremmin lämpöä eristävät seinät, sisälämpötila pysyy sallituissa rajoissa pidempään lämmitystehon laskemisesta huolimatta.

Säätövoimaa pystytään tarjoamaan tarkastellussa kuvitellussa rakennuksessa alaspäin parhaimmillaan koko maalämpöpumpun tehojen verran, mikä on toki harvinaista, sillä maalämpöpumppua ajetaan harvoin 100 %:n tehoilla. Enimmillään suurissa rakennuksissa tämä on siis noin 25 kW luokkaa. Kestävämpi tapa tarjota säätövoimaa on pudottaa tehot 60 %:n lämmitystarpeesta, jolloin sisälämpötilan aleneminen hidastuu huomattavasti. Tällöin myös maalämpöpumpun tarjoama säätövoima pienenee huomattavasti.

On kuitenkin syytä pohtia, kannattavuutta jos hieman 0 °C alapuolella oltaessa pudotettaisiin maalämpöpumpusta kaikki tehot pois. Tällöinkin sisälämpötila laskee suhteellisen hitaasti, esimerkiksi tapauksessa noin 7 tunnissa. Äärimmäisissä pakkasissa on syytä pudottaa vain jokin osuus tehoista, jotta tilannetta pystytään ylläpitämään pidempään. Myös tarjottavan säätövoiman ajanjakso on pidettävä mukana pohdittaessa tehonlaskuja ja sen vaikutusta sisälämpötilaan.

Kun lämmitystarve on alhaisimmillaan kesällä, ei maalämpöpumpulla ole yhtä suurta potentiaalia tarjota säätövoimaa alas. Kun tiloja ei tarvitse lämmittää on lämminkäyttövesiverkosto ainoa säätövoiman lähde. Uudemmissa tekniikoissa pystytään maalämpöpumpun maapiirillä viilentämään rakennusta, jolloin säätövoimaa tehoja laskemalla pystyttäisiin tarjoamaan. Tämä vaatii kuitenkin enemmän perehtymistä.

7.4.1 Säätövoiman määrä verrattuna FCR-markkinoihin

FCR-markkinoilla voivat säätötilanteet olla hyvinkin nopeita. FCR-N markkinoilla säädöt voivat olla jopa alle tunnin mittaisia ja niitä usein tapahtuu suurin piirtein sama määrä molempiin suuntiin. Tämä tasapainottaa tilannetta ja äärimmilleen vietyjä sisäolosuhteita ei pääse tapahtumaan, jonka takia säätöä voi tarjota vuorokauden ympäri ilman, että rakennuksen täytyisi palautua aiemmista säädöistä. Tunnin aikainen tehojen lasku ei vaikuta missään lämpötilassa tai millään tehojen pudotuksella merkittävästi lämpötilaan, ja rakennuksen sisäilmaolosuhteet palautuvat tästä nopeasti, vaikka lämmitys lopetettaisiinkin tunnin ajaksi. FCR-D markkinat ovat yleisesti FCR-N markkinoita nopeampia, jolloin säätötilanteita pystytään myöskin tarjoamaan vuorokauden ympäri. Tilanteet ovat useimmiten nopeita päälle/pois tyyliä säätötilanteita, joissa pudotetaan nopeasti kaikki tehot minimiin, mutta tilanne ei kestä pitkään.

Muut reservimarkkinat ovat yleisesti hitaampia, jolloin tarvitaan usean tunnin tehonpudotuksia. Tällaisessa tilanteessa maalämpöpumpulla voidaan tarjota esimerkiksi neljän tunnin ajan tehonlaskua, mutta ongelmaksi muodostuu rakennuksen sisäilmaolosuhteiden palautuminen tilanteesta. Neljän tunnin mittaisia säätöjä ei voida tarjota liian usein, jotta sisäilmaolosuhteet eivät huonone merkittävästi.

7.5 Säätövoima tehojen nostamisella

Säätövoimaa ylöspäin pystytään tarjoamaan käytännössä niin paljon, kuin kunakin hetkenä maalämpöpumpulla on jäljellä tehoja normaalin lämmitystehon jälkeen. Tämä voidaan suunnata lämpimän käyttöveden lämmittämiseen lämminvesivaraajassa tai tarvittaessa myös hetkellisesti lämmityspiiriin. IV- koneisto liitetään mukaan kysyntäjoustoon tarjottaessa säätövoimaa maalämpöpumpulla, joten poistopuhaltimen tehojen lisääminen vähentää yllilämpenemistä.

7.6 Kuorman riittävyys

Maalämpöpumpun kuorma itsessään ei riitä tarjoamaan säätöreserviä kumpaankaan suuntaan, mutta liitettäessä mukaan rakennuksen ilmanvaihtokoneet, voi säätövoima parhaimmillaan ylittää lähes 40 kW:n otettaessa huomioon Luoman (2015) havainnot 18–20 kW:n säätövoimasta kuuden ilmanvaihtokoneen puhaltimien tehoja säätämällä. Myöskään 40 kW:n säätökuorma ei riitä teho-vaatimuksiltaan Fingridin vaatimukseen FCR-N tai FCR-D reservituotteisiin. Kuormia on siis yhdisteltävä monen rakennuksen tai toimijan kanssa. 40 kW:n säätökuorma on myös mahdollista ainoastaan hyvin suurilla rakennuksilla ja suurimmassa osassa toimistorakennuksia ja liikekiinteistöjä on todennäköisesti mahdollinen säätökuorma pienempi.

Säätövoimaa tarjottaessa on myös huomioitava, että mikäli kuormaa tarjotaan ja sitä ei pystytä toteuttamaan, tulee kuorman tarjoajalle taloudellisia sanktioita. Sanktioiden vuoksi tarjottava säätövoima tulee olla aina realistisesti toteutettavissa.

8 Johtopäätökset

Työn yhtenä suurimpana tavoitteena oli luoda mitatun datan perusteella hälytyslista, joilla pystytään toteamaan ja ennustamaan maalämpöpumpun huollontarpeita ja vikatilanteita. Vikatilanteiden diagnostiikan osalta asetettiin tutkimuskysymykseksi seuraava kysymys:

- Miten maalämpöpumpun prosessien mittatiedon avulla voi ennustaa ja havaita maalämpöpumpun vikatilanteita ja huollontarvetta?

Nämä tulokset ovat esitettyinä taulukossa 2. Tuloksiksi listattiin maalämpöpumpun potentiaalisia vikatiloja, jotka pystytään ennustamaan tai havaitsemaan mittatiedon perusteella. Vikatilanteille määritettiin seuraukset ja todennäköiset korjaustoimenpiteet. Näiden hälytysten laadun todentamiseksi on tarpeellista luoda case- esimerkki, jossa testataan sääntöjen toiminta ja luotujen hälytysten oikeellisuus. Case-tapauksen avulla saataisiin käytännönläheistä palautetta hälytyksien toimivuudesta ja niitä pystyttäisiin korjaamaan. Se ei kuitenkaan tässä työssä ollut mahdollista, sillä toimeksiantajalla ei vielä ole asiakasta, jonka maalämpöpumppujen dataa olisi voinut hyödyntää. Työn tarkoitus oli valmistautua tulevaan kysyntään, jotta tulevaisuudessa maalämpöpumppujen kunnonvalvontaan pystytään tarjoamaan vaihtoehtoja asiakkaalle. Hälytyslistan perusteella voidaan kuitenkin jo alkaa toteuttamaan algoritmeja toimeksiantajan energiavalvontajärjestelmään, jotta ne ovat valmiina maalämpöpumppuasiakkaille. Kun hälytyksiä päästään testaamaan, niistä todennäköisesti löytyy kehitettävää. Etenkin realistiset arvot esimerkiksi lämpötila ja painepisteiden raja-arvoihin täytyy etsiä maalämpöpumppukohtaisesti. Vikadiagnosoinnin osalta opinnäytetyön tulokset ovat tutkimuskysymyksen mukaiset. Tuloksien laatua ei pystytä todentamaan, joka heikentää työn luotettavuutta, mutta työn tarkoitus olikin valmistautua tulevaan kysyntään, joten jatkokehittämistarve oli tiedossa jo työn alussa. Testausvaiheessa tarkennettavaa tulee erityisesti hälytysten oikeellisuudesta. Erityisen tärkeää on, että tuotteen ollessa tuotannossa, se ei hälytä valheellisesti vikatilanteista ja käytä huoltohenkilökunnan aikaa turhiin työmaakäynteihin. Toinen seurattava asia on korjausehdotusten oikeellisuus, jotta pystytään nopeuttamaan huoltohenkilökunnan viettämää aikaa maalämpöpumpulla ja näin vähentämään korjaukseen kuluvia kustannuksia.

Maalämpöpumpun sovelluspohjaista ohjausta voi lähteä suunnittelemaan työn avulla. Tutkimuskysymykseksi sovelluspohjaisen ajamisen osalta asetettiin seuraava:

- Onko maalämpöpumppu soveltuva ohjelmistopohjaiseen ajamiseen?

Tutkimuskysymys asetettiin sovelluspohjaista ajamista valmistelevaksi, sillä sen toteutus suuntautuu ICT- ja datatieteen aloille. Työn luotettavuutta heikentää sovelluspohjaisen ohjauksen osalta eri valmistajien ohjaustekniikoiden erilaisuus. Maalämpöpumppuihin täytyy tutustua syvällisesti aina ennen ohjauksen aloittamista ja todennäköisesti kaiken kattavaa mallia ei pystytä luomaan. Kuitenkin lähtökohtana on aina pitää lämmitysverkoston menoveden lämpötila ja virtaus, eli lämpöteho tarpeenmukaisena ja tasaisena. Kun sovelluspohjaista ohjausta aloitetaan suunnittelemaan, on ensimmäinen valinta ohjauksen syvyys. Alkuun tulee päättää, ohjataanko pelkästään maalämpöpumpun tehoja vai myös maalämpöpumpun sisäistä prosessia. Toimeksiantajan AI Heat-malli, jolla optimoidaan yleisesti lämmitysprosesseja, hyödyntää jo ilmatieteenlaitoksen tarjoamia lämpötilanennusteita, joten malli lämpötilaennustusten avulla ajamiseen on jo hyödynnettävissä. Auringon lämpökuorman avulla sisälämpötilan kehittymisen ennustaminen on vielä toteuttamatta, joten se vaatii toteutuksena enemmän työtä. Tutkimuskysymyksen mukaisesti työssä selvitettiin sovelluspohjaisen ajamisen tarpeet ja kysymyksen lisäksi selvitettiin erilaisia ennusteita, joiden avulla pystyttäisiin tehostamaan maalämpöpumpun ajamiseen luotavaa koneoppimismallia. Jatkotutkimusta sovelluspohjaisesta ajamisesta tarvitaan erityisesti auringon lämpökuorman selvittämiseen tarkasti. Lisäksi maalämpöpumpun koneoppimismallien luomiseen on toteutettavissa tämän työn jatkoksi tutkimuksia.

Maalämpöpumpun soveltamisessa kysyntäjoukseen päätavoitteena oli selvittää kuinka paljon ja kuinka pitkään maalämpöpumpun ottotehoa pystytään säätämään ilman, että se vaikuttaa merkittävästi sisälämpötilaan. Tutkimuskysymyksiksi kysyntäjoukko-osuuteen asetettiin seuraavat kysymykset:

- Mikä on maalämpöpumpun potentiaali kysyntäjoukossa?
- Kuinka paljon maalämpöpumpun tehoja pystytään säätämään ilman, että se vaikuttaa merkittävästi sisäilmaolosuhteisiin?

Sisälämpötilan kehittymistä havainnollistettiin laskennallisesti kuvitellussa esimerkkirakennuksessa, jonka avulla pystyttiin vetämään suuntaa antavia johtopäätöksiä siitä, kuinka paljon tehoja voidaan säätää ja kuinka pitkän aikaa. Kuten myös kahdessa aikaisemmassakin aiheessa, myös kysyntäjoustosta tulisi tehdä case-esimerkki, jolla pystyttäisiin havainnollistamaan sisälämpötilan kehitystä ja säätötehon tarjontaa käytännön olosuhteissa. Säätövoiman tarjontaan vaikuttaa sen pituus ja tehontarve. Mikäli säätövoimaa tarjotaan esimerkiksi FCR-D markkinoille, joissa on perinteisesti lyhyitä säätöjä, voidaan säätövoimaa tarjota suuremmilla tehoilla. Jos taas tarjotaan FCR-N markkinoille, joissa on perinteisesti tarvetta pidemmän aikavälin säätövoimalle, voidaan tehot pudottaa johonkin prosenttiosuuteen maksimista. Tässä työssä laskettiin esimerkit 0 % ja 60 % tehoilla, mutta samaa laskukaavaa voidaan käyttää myös muiden prosenttiosuuksien laskemiseen. Kuitenkin tarkimmat tulokset saadaan käytännön kokeiden kautta, sillä laskennassa yksinkertaistetaan monia asioita, kuten ihmisen toimintaa rakennuksessa. Myös rakennuksien rakenteiden lämmöneristykset vaihtelevat taulukkoarvoista. Maalämpöpumpun potentiaali kysyntäjoustossa tuli tutkimuksessa hyvin ilmi sisälämpötilan kehittymisen kautta. Maalämpöpumpukohtainen potentiaali kuitenkin tulee arvioida laitekohtaisesti, sillä lämpöpumpun tehojen suuruus määrittää säätökuorman määrän.

Vikadiagnosoinnin, sovelluspohjaisen ohjaamisen ja kysyntäjoustopuun implementoinnista tulisi tehdä kustannuslaskelmat, joka voisi olla oma opinnäytetyönsä. Kustannuslaskelmiin hyvä lisä olisi päästövähenyslaskelmat, jotta havaitaan tuotteiden vaikutus ympäristöön. Sekä asiakkaan, että toimiesimiehen puolesta on tärkeää tietää tuotteiden liittämisen ja käyttämisen kustannukset, sillä taloudelliset asiat tulevat usein ensimmäisenä uutta palvelua ostaessa.

9 Pohdinta

Opinnäytetyön tulokset ovat onnistuneet, vaikka rajoitteita on asettanut jo ilmaistu tapaustutkimuksen puuttuminen. Tapaustutkimusta ei ole toisaalta suunniteltu missään vaiheessa työtä toimiesimiehen asiakaskunnan myötä, joten tulosten laadunvarmistamista ja seuranta ei voida pitää yhtenä työn tavoitteena. Tavoitteena kuitenkin oli luoda pohja maalämpöpumpun sovellutusten suunnittelulle, josta voidaan jatkaa tuotekehitystä myöhemmin käytännössä, joka on hyvin onnistunut. Työn alussa suunniteltiin puolistrukturoituja haastatteluja maalämpöpumpujen toimittajille ja huoltohenkilöstölle maalämpöpumpun vikatilanteista, mutta opinnäytetyön kohdis-

tuessa kesä-elokuulle, oli yritysten lomakausi kiireisimmillään ja vastaus saatiin noin 20 sähköpostista ainoastaan yhdeltä yritykseltä, joille haastatteluja olisi haluttu toteuttaa. Tämä puute kuitenkin korvattiin onnistuneesti kirjallisuudella.

Vikadiagnosoinnin ei voida olettaa olevan koskaan valmis, sillä maalämpöpumpputekniikka edistyy alan mukana ja uusia vikatilanteita sekä optimoinnintarpeita ilmenee. Lisäksi valmistajien mittaukset ja käytännön toteutukset saattavat vaihdella, joten uusia hälytyksiä tulee luoda vielä jatkossakin, jotta ne toimivat mahdollisimman monessa maalämpöpumpussa, hälytykset pysyvät ajan tasalla ja hälytysten arvo ei vähene. Arvon vähenemisen huomaa siitä, jos henkilökunta, joka reagoi hälytyksiin alkavat oletamaan, että huollontarvetta ei oikeasti olisi ja jättävät hälytykset huomiotta. Tähän voidaan vaikuttaa hälytysten laadulla eli sillä, että hälytykset eivät hälytä turhaan. Diagnostiikka haastaa myös laitteiden huoltoon ja optimointiin liittyviä rakenteita siten, että laitteiden käyttö ei ole vain huoltohenkilökunnan tai asentajien vastuulla. Mikäli laitteita halutaan ajaa niiden täydellä potentiaalilla, tarvitaan siinä asiantuntijoiden ja huoltohenkilökunnan yhteistyötä. Kaikki luodut hälytykset eivät kuulu huollolle, vaan jotkin tulee ohjata energia-asiantuntijoille, jotka pyrkivät optimoimaan laitetta sen korjaamisen sijasta.

Jotta maalämpöpumpuista, ja yleisesti muista kiinteistöjen energiankäyttöön liittyvistä prosesseista, saadaan kaikki potentiaali irti, on niiden ohjausmekanismeja tarpeellista muuttaa tarpeenmukaisiksi. Tarpeenmukaisessa ohjaamisessa kriittistä on se, että niitä voidaan ohjata sovelluspohjaisesti. Se mahdollistaa koneoppimismallien luomisen lisäksi lähes loputtomat mahdollisuudet lämmitysprosessien ohjaamiseen. Todella harvan kiinteistön energiajärjestelmiä ohjataan sovelluspohjaisesti, joten tämä työ on alan edistämisen vuoksi tärkeä. Automaatiojärjestelmät asettavat rajoitteet energiajärjestelmien optimoinnille, mutta sovelluspohjaisesti niitä ei käytännössä ole. Vaikka tekoälyratkaisuja ei tutkittu ylätasoa tarkemmin, on silti huomioonotettavaa sen mahdollisuudet tulevaisuuden talotekniikan ohjaamisessa. Koneoppimismalleilla pystytään ennustamaan sääolosuhteiden kehittymisen avulla lämmitys- ja ilmanvaihtotarpeita. Myös rakennuksen käyttöastetta ja lämpötilan tai CO₂-pitoisuuden kehittymistä voidaan ennustaa koneoppimismalleilla eri mittauksien avulla, joilla pystytään reagoimaan rakennuksen sisäisiin kuormiin ajoissa.

Usealla kaupungilla on olemassa hankkeita, joissa suunnitellaan maalämpöpumppujen keskitettyä lämmöntuotantoa (Passi, Kontu, Rinne & Ruhonen 2016). Ison mittakaavan lämmöntuotannossa

on vielä tärkeämpää, että prosessit ovat optimaalisia. Tällöin samoilla toimenpiteillä saadaan suurempia säästöjä ja saadaan tuotettua yhtä paljon lämpöenergiaa samalla sähköenergian kulutuksella. Myöskin keskitetty maalämpö toisi suurta potentiaalia lämmön ja sähkön säätelyyn piikkikulutustilanteissa, joita tässä työssä tutkittiin. Keskitetyssä tuotannossa olevalla maalämpöpumpulla voitaisiin mahdollisesti jopa toteuttaa yksinään reservimarkkinoille tarjottavaa säätövoimaa. On siis tarpeellista pohtia näiden tuotantolaitosten ohjaamista sovelluspohjaisesti. Keskitetyssä lämmönjakelussa käytetyn maalämpöpumpun tehojen laskun seuraukset ovat hyvin erilaiset verrattuna yksittäisen rakennuksen lämmittämiseen käytettävää maalämpöpumppua, joten työtä ei voi suoraan verrata keskitettyyn maalämpöpumpun kysyntäjousto.

Lähteet

3.1 Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. 2021. Valtioneuvosto. Hallitusohjelma. Viitattu 11.08.2021. <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiilineutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>.

Airaksinen, M. 2013. Heating Energy and Peak-Power Demand in a Standard and Low Energy Building. VTT. Tutkimusartikkeli. https://www.researchgate.net/publication/277488271_Heating_Energy_and_Peak-Power_Demand_in_a_Standard_and_Low_Energy_Building.

Automaattinen taajuudenhallintareservi. N.d. Fingrid. Viitattu 06.07.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>.

Divedi H.K. N.d. Pressure relief valve working principle and its internal construction. www-sivu. Viitattu 02.07.2021. <https://www.hkdivedi.com/2016/03/pressure-relief-valve-working-principle.html>.

Energian loppukäyttö. 2021. Motiva. www- sivut. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian-kaytto-suomessa/energian_loppukaytto.

Esite- Lämpöä omasta maasta. N.d. Motiva. Viitattu 17.05.2021. https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf.

Fakta 79: Näin huollat maalämpö- tai vesi-ilmalämpöpumppua itse. 2017. Lämpöykkönen. www-sivut. Viitattu 22.06.2021. <https://lampoykkonen.fi/100faktaa/fakta-79-nain-huollat-maalampo-ja-vesi-ilmalampopumppua-itse/>.

Hakala, P. Kaappola, E. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. Opetushallitus.

Inverttiohjattu kompressori. N.d. Thermia lämpöpumput. www- sivut. Viitattu 03.06.2021. <https://www.thermia.fi/hyodyllista-tietoa/miten-lampopumppu-toimii/lampopumppu-tekniikka/inverter/>.

Julin, V. 2019. Demand response in commercial buildings. Diplomityö. Aalto-yliopisto. <https://aalto-doc.aalto.fi/handle/123456789/37112>.

Juvonen, J. 2009. Lämpökaivo: Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. SYKE. Viitattu 17.05.2021. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38833>.

Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M & Kianta, J. 2011. Kylmätekniikan perusteet. Opetushallitus.

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kananen, J. 2014. Laadullinen tutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kulutuksen ja Tuotannon tasapainon ylläpito. N.d. Fingrid. Viitattu 10.06.2021. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>.

Kylmäinfo- vihjeitä asentajille. 2008. Danfoss. Uutisartikkeli. Viitattu 03.08.2021.
<https://docplayer.fi/8238366-Kylmainfo-2-2-0-0-8-vihjeita-asentajille.html>.

Kylmäkompressorit hermeettisestä avokompressoriin. N.d. Darment. www- sivut. Viitattu 03.06.2021. <https://darment.fi/kylmakompressorit-hermeettisesta-avokompressoriin/>.

Känsälä, K. Hammar, K. 2018. Säättövoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle. Raportti.
https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/whitepapers/VTTWhitePaper2018-Saatovoimaa_tulevaisuuden_sahkomarkkinalle.pdf.

Lappi, J. 2013. Maalämpöpumpun lämmönkeräysjärjestelmän kehittäminen pientalokohteessa ja maalämpöjärjestelmien teknistaloudellinen vertailu. Opinnäytetyö, AMK. Lahden ammattikorkeakoulu. Viitattu 17.05.2021. <https://www.theseus.fi/handle/10024/63021>.

Lauttamäki, V. & Kallio, J. 2013. Geoenergiasta liiketoimintaa: perusteluja geoenergian hyödyntämiselle erilaisissa rakennuskohteissa. Tutkimus. Geologian tutkimuskeskus. Viitattu 17.05.2021.
https://tupa.gtk.fi/julkaisu/tutkimusraportti/tr_206.pdf.

Lehtinen T. 2018. Energiatehokkuus: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Rakentamismääräys. Ympäristöministeriö. https://www.motiva.fi/files/16484/Energiatehokkuus_-_Rakennuksen_energiankulutuksen_ja_lammitystehontarpeen_laskenta.pdf.

Leinonen P. 2018. Mitä on inertia?. FINGRID. Lehtiartikkeli. Viitattu 01.07.2021. <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>.

Levylämmönvaihdin: toimintaperiaate Lamelliset lämmönvaihtimet: laite. (N.d.). Mentorbliz. www- sivut. Viitattu 08.06.2021. <https://fin.mentorbizlist.com/3969689-plate-heat-exchanger-principle-of-operation-lamellar-heat-exchangers-device>.

Lubofsky, E. 2010. Monitoring Geothermal Heat Pumps. Artikkel. Viitattu 22.06.2021.
<https://www.fierceelectronics.com/components/monitoring-geothermal-heat-pumps>.

Luoma, J. Liike-, toimisto- ja koulurakennuksien sähkökuormat kysynnän jouston reserveinä. 2015. Viitattu 03.08.2020. <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/22880>.

Lämpöpumpun asennus- ja käyttöohje. 2019. Käyttöohje. Oilon. Viitattu 03.06.2021. https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon_kiinteist%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6pumpujen_asennus-ja_k%C3%A4ytt%C3%B6ohje_kaikki_mallit_FI.pdf.

Lämpöpumpun toimintaperiaate. 2017. Youtube video. Bosch Lämpötekniikka. Viitattu 03.06.2021. Haettu osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=zvJ-X1a5Etk>.

Maalämpöpumppu. 2020. Motiva. www- sivut. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat/maalampopumppu.

Maaperä lämmön lähteenä. N.d. www- sivut. Sulpu. Viitattu 17.05.2021.
<https://www.sulpu.fi/maapera-lammon-lahtena>.

Passi, P. Kontu, K., Rinne, S. & Ruhonen, S. 2016. Suuret lämpöpumpu kaukolämpöjärjestelmässä. Tutkimuksen loppuraportti. https://energia.fi/files/993/Suuret_lampopomput_kaukolampojarjestelmassa_Loppuraportti_290816_paivitetty.pdf.

Reservit ja säätösähkö. N.d. Fingrid. Viitattu 17.06.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>.

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 2018. Fingrid. Esitysmateriaali. Viitattu 06.07.2021. <https://www.epressi.com/media/userfiles/132826/1540387680/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>.

Rohner, E. 2008. Measurement techniques for geothermal heat pump – Borehole heat exchanger quality control. Geowatt ag. Konferenssi esitys. Viitattu 30.06.2021. <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/new-measurement-techniques-for-geothermal-heatpump-borehole-heat-exchanger-quality-control/>.

Räisä, J. 2013. Maalämpöpumppu laboratorio oppimisympäristönä. Opinnäytetyö, AMK. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Viitattu 08.06.2021. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59560/Opinnaytetyo%2016052013.pdf?sequence=1>.

Sainio, E. Maalämpöpumpun käyttöönotto ja optimointi. 2015. Opinnäytetyö, AMK. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Viitattu 01.08.2021. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/105246/Maalampopumpun%20optimointi%20ja%20kayttoonotto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Salonen, O. 2017. Sähkön kysyntäjoustopuormanhajusten tekniset toteutusmallit pienkiinteistöissä. Diplomityö. Lappeenrannan yliopisto. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/133874/diplomityo_salonen_otso.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Soomro, A. 2020. How do Geothermal Heat Pumps work? Environment buddy. www-sivut. Viitattu 03.06.2021. <https://www.environmentbuddy.com/energy/geothermal-energy/how-do-geothermal-heat-pumps-work/>.

Suomen lämpöpumpputilastot. 2020. Sulpu. Viitattu 11.08.2021. <https://www.sulpu.fi/suomen-lampopumpputilastot-vuosi-2020/>.

Syrjäsalon, N. 2013. Maalämpöpumppujen käynnistysten verkkovaikutukset. Opinnäytetyö, AMK. Tampereen ammattikorkeakoulu. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/56819/Syrjasalo_Niko.pdf?sequence=1.

Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat. N.d. Fingrid. Viitattu 06.07.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko-ja-saatokapasiteettimarkkinat/>.

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. N.d. Fingrid. Viitattu 06.07.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/>.

Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin vuosisopimus. 2018. Fingrid. Viitattu 05.08.2021. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/taajuusohjatun-kaytto-ja-hairioreservien-vuosisopimus-2018.pdf>.

Toivanen, J. 2019. Maalämpöjärjestelmän liittäminen kiinteistöautomaatiikkaan. AMK-opinnäytetyö. Viitattu 21.07.2021. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/190597/Toivanen_Jani.pdf?sequence=2.

Tuomi, J. & Sarajärvi A. 2013. Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi. Kustannusosakeyhtiö Tammi. Helsinki.

Varavoimailaitokset. N.d. Fingrid. Viitattu 06.07.2021. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/varavoimailaitokset/>.

Ylikulutus. 2021. WWF. Uutinen. Viitattu 11.08.2021. <https://wwf.fi/uhat/ylikulutus/>.

Liitteet

Liite 1. Porakaivon rakenne (Juvonen 2009)

