

Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka

Kandidaatintyö

Kerrostalojen lämpöpumppujen sähköntarpeen ja kannattavuuden suunnittelulaskelmat
ja toteumat

21.4.2019

Markus Kolehmainen

Tekijä Markus Kolehmainen

Työn nimi Kerrostalojen lämpöpumppujen sähköntarpeen ja kannattavuuden suunnittelulaskelmat ja toteumat

Koulutusohjelma Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

Pääaine Energia- ja ympäristötekniikka**Pääaineen koodi** ENG3042

Vastuupettaja Jukka Paatero

Työn ohjaaja(t) Timo Kalema

Päivämäärä 21.4.2019**Sivumäärä** 26 + 1**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Työn tavoitteena oli selvittää maa- ja poistoilmalämpöpumppuinvestointien taloudellinen kannattavuus kaukolämmiteisissä asuinkerrostaloissa. Kannattavuustarkasteluissa käytettiin vaihtoehdokustannuksena kaukolämmössä pysymistä. Lämpöpumpun kannattavuuteen vaikuttaa olennaisesti mitoitus. Mitoitusta tutkittiin vuotuisen energiantuoton ja hetkellisen huipputehon näkökulmasta. Käytettyjä tutkimusmenetelmiä olivat kirjallisuustutkimus ja esimerkkikohteiden kulutus-tietojen perusteella tehdyt laskelmat.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella maalämpöpumppu kannattaa mitoittaa suhteelliselta lämpötehoaltaan tuottamaan 80–90 % mitoituslämpötilan tehontarpeesta. Tällöin lämpöpumpun suhteellinen lämpöenergian tuotto on 95–100 % vuotuisesta lämmityksentarpeesta. Tarvittava lisälämmitys kannattaa tuottaa sähkövastuksilla. Täystehomitoitus ei ole taloudellisesti kannattavaa, koska erittäin kylmät lämpötilat ovat harvinaisia. Poistoilmalämpöpumpulla voidaan tuottaa noin puolet rakennuksen vuotuisesta lämmityksentarpeesta. Lämpöpumpun vuotuisen suhteellisen lämpöenergian tuoton ollessa noin 50 % on vielä kannattavaa tuottaa tarvittava lisälämmitys kaukolämmöllä.

Molemmilla menetelmillä saadut tulokset puoltavat lämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta. Lämpöpumppujen kannattavuus perustuu niiden ominaisuuteen siirtää enemmän lämpöä suhteessa kulutettuun sähköön. Lämpökerroin kuvaa siirretyn lämmön suhdetta kulutettuun sähköön. Lämpöpumppujen lämpökertoimet ovat tyypillisesti noin 2–4.

Työssä tarkastellaan kahta esimerkkikohtetta: Helsingissä sijaitsevaa taloyhtiötä, joka siirtyi maalämpöön vuonna 2012 ja Jyväskylässä sijaitsevaa taloyhtiötä, johon asennettiin poistoilmalämpöpumppu vuonna 2013. Lämpöpumppuinvestoinneille laskettiin nykyarvot niiden arvioitujen elinkaarten ajalta. Laskelmissa käytettiin tähän mennessä toteutuneita kulutuksia, joiden perusteella arvioitiin tulevaisuuden arvot. Laskelmien perusteella investoinnit ovat taloudellisesti kannattavia. Esimerkkikohteissa lämpöpumpuilla on saavutettu noin 30–50 % vuotuinen säästö lämmityskustannuksissa.

Avainsanat maalämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu, lämpöpumpun mitoitus, lämpöpumpun taloudellinen kannattavuus

Sisällysluettelo

1 Johdanto.....	1
2 Lämpöpumput.....	3
2.1 Lämpökerroin	3
2.2 Lämpöpumppuprosessin termodynamiikka.....	4
2.3 Ideaalinen lämpöpumppusykli.....	6
2.4 Lämmönlähteet	7
2.5 Lämmönjakotavat	9
2.6 Kylmäaineet.....	9
3 Mitoitus ja sähkötarve	10
3.1 Maalämpöpumput.....	11
3.2 Poistoilmalämpöpumput.....	12
3.3 Järjestelmänäkökulma	13
4 Taloudellinen kannattavuus.....	15
4.1 Sähkön ja kaukolämmön hinnat	15
4.2 Kannattavuuslaskelmat.....	19
4.3 Asunto Oy Kivelänkatu 1 b, Helsinki.....	21
4.4 Asunto Oy Vuorikilpi, Jyväskylä	22
5 Yhteenveto.....	23
Lähteet	24
Liitteet.....	1

1 Johdanto

Asuinrakennusten tilojen ja käyttöveden lämmitys kuluttaa Suomessa noin 17 % koko energian loppukäytöstä. Vuonna 2017 asuinrakennusten tilojen lämmitys kulutti 45 TWh energiaa ja käyttöveden lämmitys 10 TWh. (Tilastokeskus, 2018a.) Kerrostalojen lämmitystapa on useimmiten kaukolämpö. Vuonna 2017 Suomen kaukolämmöntuotanto oli 36,6 TWh, josta pääkaupunkiseudun kaukolämmöntuotanto oli 9,6 TWh. Suomen kaukolämmöntuotannosta noin puolet tuotettiin fossiilisilla polttoaineilla. Kivihiilen osuus tuotannosta oli 23 %. (Energiateollisuus, 2018a.) Pääkaupunkiseudulla kaukolämpöä tuotetaan lähinnä fossiilisilla polttoaineilla kivihiilellä ja maakaasulla. Vuonna 2017 kivihiilellä tuotettiin 53 % ja maakaasulla 21 % pääkaupunkiseudun kaukolämmöstä. (HSY, 2018.)

Kivihiilen käyttö sähkön ja lämmön tuotannon polttoaineena kielletään Suomessa vuonna 2029 (TEM, 2019). Kiellon voi olettaa nostavan kaukolämmön tuotantokustannuksia. Työ- ja elinkeinoministeriön Pöyryltä tilaaman selvityksen mukaan kivihiilen kieltö aiheuttaa merkittävimmät kustannukset Helsingin, Espoon ja Vaasan kaukolämmöntuotannolle. Vuonna 2030 voimaan tulevan kiellon arvioidaan aiheuttavan Helsingissä kaukolämmön loppukäyttäjälle 0–5 % vuosittaisen hinnankorotuksen ennakaisen korjausinvestoinnin aikavälille. Vaasassa loppuasiakkaan hinnankorotukset olisivat jopa 15–20 % vuosittain ennakaisen korvausinvestoinnin aikavälillä. (Pöyry, 2018.)

Lämpöpumppujen käyttö asuinrakennusten lämmitykseen on lisääntynyt voimakkaasti 2000-luvulla, ja mahdollisten kaukolämmön hinnankorotusten voi olettaa osaltaan kasvattavan talokohtaisten lämpöpumppujärjestelmien suosiota. Eniten lämpöpumppuja käytetään pientaloissa. Vuonna 2017 lämpöpumpuilla tuotettiin asuinrakennuksille 5,8 TWh lämpöä. Suurin osa tästä, 4,2 TWh, käytettiin pientaloissa. Asuinkerrostalojen lämmitykseen käytettiin vuonna 2017 vain 69 GWh lämpöpumppuenergiaa, joka on alle prosentin asuinkerrostalojen vuosittaisesta lämmityksentarpeesta. Suomessa on paljon 1960-1990-luvulla rakennettuja energiatehokkuudeltaan huonoja asuinkerrostaloja, joihin sisältyy valtava energiansäästöpotentialiaali. (Tilastokeskus, 2018b.)

Kaukolämmöntuotannon lisäksi Suomen sähköntuotannon voi myös odottaa kokevan muutoksia lähitulevaisuudessa, mutta kivihiili ei ole sähköntuotannossa läheskään yhtä merkittävässä osassa kuin kaukolämmöntuotannossa. Vuonna 2018 Suomen sähköntuotannosta 9 % tuotettiin kivihiilellä ja 79 % tuotannosta oli hiilidioksidineutraalia. Tuuli-voiman sähköntuotanto on kasvanut viime vuosina voimakkaasti, ja vuonna 2018 tuuli-voimalla tuotettiin jo yhtä paljon sähköä kuin kivihiilellä. Kun Olkiluoto 3 -ydinvoimala valmistuu, tulee hiilidioksidineutraalin sähköntuotannon osuus vielä kasvamaan. (Energiateollisuus, 2019.)

Lämpöpumppujen ulkoa rakennukseen sisään siirtämä lämpöenergia on joko auringon säteilyn energiaa tai kallioon porattavien lämpökaivojen tapauksessa maansisäistä geotermistä energiaa. Lämpöpumppuja voidaan siis pitää ympäristöystävällisenä tapana lämmittää asuinrakennuksia Suomessa. Myöskin muuten hukkaan menevän poistoilman lämpöenergian hyödyntäminen lämmitykseen lisää rakennuksen energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Kuluttajien lisääntyneen tietoisuuden ilmastonmuutoksesta ja heidän valintojensa ilmastovaikutuksista voi olettaa lisäävän kiinnostusta lämpöpumppujärjestelmiä kohtaan.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan lämpöpumppuinvestointien taloudellista kannattavuutta ja lämpöpumppujen mitoittamista Suomessa sijaitseviin asuinkerrostaloihin. Ensimmäisessä luvussa kuvataan lämpöpumpputekniikkaa yleisesti, minkä jälkeen siirrytään tarkastelemaan tarkemmin tutkimuksen rajauksen mukaisia kohteita. Työssä arvioidaan myös lämpöpumppujärjestelmien yleistymisen vaikutuksia systeemitasolla. Lämpöpumpputekniikoiden osalta tarkastelu on rajattu sähkökäyttöisiin suljetun kierron kompressorilämpöpumppujärjestelmiin, joiden lämmönlähteenä on maa tai poistoilma.

Taloudellista kannattavuutta verrataan suhteessa olemassa olevaan kaukolämpöjärjestelmään. Lämmitysvaihtoehtojen kannattavuutta arvioidaan nykyarvomenetelmällä, jossa tulevaisuudessa syntyvät kustannukset diskontataan nykyhetkeen. Tulevaisuudessa syntyviin kustannuksiin liittyy aina epävarmuutta ja oletuksia. Näistä syistä laskelmille suoritetaan herkkyyksianalyysijä. Herkkyyksianalyysien tavoitteena on tarkastella kuinka paljon muutos lähtöarvoissa vaikuttaa investoinnin lopulliseen kannattavuuteen. Herkkyyksianalyysi toteutetaan laskentakorolle ja investoinnin käyttöiälle. Toteutuneiden investointien käyttöönoton jälkeisiä toteutuneita kustannuksia verrataan laskelmiin, joiden perusteella investointi on arvioitu kannattavaksi ja toteutettu. Työn tavoitteena on luoda käsitys suunnittelulaskelmissa käytettävien oletusten ja niiden perusteella tehtävien laskelmien paikansapitävyydestä.

Käytettävät tutkimusmenetelmät ovat kirjallisuustutkimus ja sen perusteella tehtävät laskelmat. Tutkimus on rajattu maantieteellisesti koskemaan rakentamismääräysten mukaisia säävyöhykkeitä 1–3. Työn esimerkkikohteet sijaitsevat Helsingissä ja Jyväskylässä. Maantieteellinen sijainti ja ilmastotyyppi vaikuttavat olennaisesti rakennusten lämmityksentarpeeseen ja siten lämpöpumppuinvestointien kannattavuuteen. Mitä suurempi rakennuksen vuotuinen lämmityksentarve on, sitä suuremmat vuotuiset säästöt on saavutettavissa edullisemmalla lämmitystavalla. Ilmastotyyppi määrää myös lämmitysjärjestelmän mitoituksen. Rakentamismääräyksissä Suomi on jaettu neljään eri säävyöhykkeeseen. Pääkaupunkiseutu kuuluu rakentamismääräysten säävyöhykkeelle 1, jossa mitoittava ulkoilman lämpötila on $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Muille säävyöhykkeille tehtyjä laskelmia ei voida täten pitää suoraan vertailukelpoisina, sillä esimerkiksi säävyöhykkeellä 3 Keski-Suomessa mitoittava lämpötila on $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja vuotuinen lämmityksentarve on suurempi. (Ympäristöministeriö, 2011.)

2 Lämpöpumput

Tässä luvussa käsitellään lämpöpumpppuolosuhteita ja -tekniikkaa teoreettisesta näkökulmasta. Yksinkertaistettuna lämpöpumppu on laite, joka siirtää lämpöenergiaa kylmäaineen faasimuutoksen avulla. Faasimuutoksen mahdollistaa fluidien höyrystymis- ja lauhdumislämpötilan riippuvuus paineesta. Lämpöpumpulla voidaan siirtää lämpöä kylmemmästä lämpötilasta lämpimämpään. Lämpöpumppu ei siis tuota lämpöenergiaa, kuten esimerkiksi polttaessa polttoaineen kemiallisesta energiasta syntyy lämpöenergiaa. Lämpöpumpun tarvitsema lämpö kerätään jostakin lämmönlähteestä. Lämmönlähteenä voi toimia ulkoilma, maa, vesistö tai rakennuksen oma poistoilma. Rakennuksissa lämpöpumppuja käytetään siirtämään lämpöä rakennuksen ja sen ympäristön välillä. Lämpöpumppuja voidaan käyttää myös jäähdytykseen, milloin lämpöä siirretään rakennuksesta sen ympäristöön. Tällöin rakennuksen sisäilma toimii lämmönlähteenä. Jäähdytykseen käytettäessä lämpöpumpun toimintaperiaate on täysin sama kuin lämmitettäessä, lämmönsiirron suunta on vain päinvastainen.

2.1 Lämpökerroin

Tärkeä lämpöpumpun toimintaa kuvaava suure on lämpökerroin (*engl. coefficient of performance, COP*). Lämpökerroin kuvaa, kuinka monta yksikköä lämpöenergiaa saadaan lämmityskäytössä siirrettyä yhdellä yksiköllä sähköenergiaa (kaava 1). Jäähdytyskäytössä vastaavaa suhdelukua kutsutaan kylmäkerroiniksi. Jäähdytyksen kylmäkerroin on yhtä pienempi kuin lämpökerroin samalla lauhdumis- ja höyrystymislämpötilan erolla, koska kompressorin kuluttamaa sähköä ei saada hyödynnettyä kuten lämmityksessä. (kaava 2)

$$COP_{hp} = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_c + W}{W} \quad (1)$$

$$COP_{ref} = \frac{Q_c}{W} \quad (2)$$

missä COP_{hp} on lämpökerroin, COP_{ref} on kylmäkerroin, W on tehty työ, Q_h on siirretty lämpö ja Q_c on lämmönlähteestä kerätty lämpö.

Lämpöpumppujen kannattavuus perustuu ominaisuuteen siirtää moninkertaisesti lämpöenergiaa suhteessa prosessiin panostettuun energiaan. Lämpö- ja kylmäkerroimen suuruus riippuu lämmönlähteen ja halutun lämpötilan välisestä lämpötilaerosta sekä lämpöpumpun ominaisuuksista. Lämpö- ja kylmäkerroin kasvavat tämän lämpötilaeron pienenessä. Tästä syystä todellisten jäähdytysprosessien kylmäkerroimet ovat usein suurempia kuin lämpökerroimet lämmityksessä, koska jäähdytyksessä lauhdumis- ja höyrystymislämpötilan ero on usein pienempi kuin lämmityksessä. (Urone & Hinrichs, 2012.)

Lämpökerrointa hyödyllisempi ja paremmin lämpöpumpun energiatehokkuutta tietyssä ilmastotyypissä kuvaava suure on kuitenkin vuotuinen lämpökerroin (*engl. seasonal coefficient of performance, SCOP*). Vuotuisella lämpökertoimella tarkoitetaan yleensä lämpöpumpun vuodessa tuottaman lämmön suhdetta sen vuodessa kuluttamaan sähköön. Vuotuisella lämpökertoimella voidaan tarkoittaa myös rakennuksen lämmityksen vuotuista lämpökerrointa. Edellä mainitut lämpökertoimet eroavat toisistaan, jos lämpöpumppu on osatehomyönteinen. Osatehomyöntö laskee rakennuksen lämmityksen vuotuista lämpökerrointa, sillä lisälämmityksen lämpökerroin on yksi. Mitoitusta käsitellään seuraavassa luvussa.

Vuotuinen lämpökerroin riippuu vuoden aikaisista ulkolämpötiloista, eli saman lämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on erisuuruinen eri ilmastossa ja myöskin samassa paikassa eri vuosina. Kylmempänä vuonna vuotuinen lämpökerroin on matalampi. Vuotuisen lämpökertoimen laskemiseen käytetään ilmastolle tyypillistä referenssivuotta. Säävyöhykkeillä 1 ja 2 referenssivuoden lämpötilat vaihtelevat välillä $-20 - +28$ °C ja vuoden keskilämpötila on $+5,6$ °C. Säävyöhykkeellä 3 referenssivuoden lämpötilat vaihtelevat välillä $-27 - +28$ °C ja vuoden keskilämpötila on $+3,4$ °C. (Ilmatieteenlaitos, 2018.)

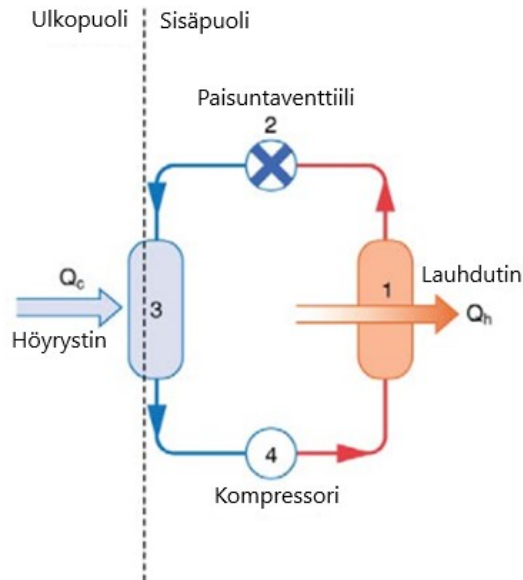
Lämmityskäytössä käytettävän lämpöpumpun lämpökertoimen teoreettinen alaraja on yksi. Tällöin lämmönlähteestä ei saada ollenkaan energiaa, vaan kaikki lämmitys tuotetaan sähköllä. Jäähdytyskäytössä lämpöpumppua saatetaan käyttää myös yhtä alemmilla kylmäkertoimilla, esimerkiksi käytettäessä absorptiolämpöpumppua jäähdytykseen (Alsaqoor & AlQdah, 2014). Tämä saattaa silti olla kannattavaa, mikäli muita tekniikoita ei ole käytettävissä tai lämmönlähde on tarpeeksi edullinen kuten hukka- tai aurinkolämpö. Absorptiolämpöpumpun käyttövoimana on sähkön sijasta lämpö. Lähellä yhtä olevalla lämpökertoimella lämpöpumpun käyttäminen lämmitykseen ei ole mielekäästä, sillä suora sähkölämmitys on tällöin taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto pienemmän alkuinvestoinnin ja huollontarpeen vuoksi. Lämpöpumppujen vuotuiset lämpökertoimet ovat noin 2–3,5 (Ympäristöministeriö, 2012).

2.2 Lämpöpumppuprosessin termodynamiikka

Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaan systeemit pyrkivät termiseen tasapainoon. Termisessä tasapainossa systeemissä ei esiinny lämpötilaeroja, vaan koko systeemissä vallitsee sama lämpötila. Jos systeemiin ei tehdä työtä, systeemin tila kehittyy spontaanisti kohti maksimaalisen entropian tilaa. Lämpö siirtyy spontaanisti aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan, kunnes lämpötilaero on tasoittunut. Rakennuksen tapauksessa lämpö siirtyy siis spontaanisti rakennuksesta ympäristöön, jos ympäristön lämpötila on alhaisempi kuin rakennuksen sisälämpötila. Pitääkseen rakennuksen sisälämpötilan vakiona täytyy rakennusta lämmittää samalla teholla kuin lämpöä siirtyy rakennuksesta ympäristöön. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi siirtämällä lämpöpumpulla lämpöenergiaa ympäristöstä rakennukseen. Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö ei kuitenkaan siirry spontaanisti matalammasta lämpötilasta korkeampaan, vaan siihen vaaditaan työtä. Lämpöpumpun tapauksessa tätä työtä vastaa lämpöpumpun kuluttama sähkö.

Yksinkertaistettuna kompressorilämpöpumppu koostuu neljästä eri osasta: kompressorista, paisuntaventtiilistä sekä kahdesta lämmönvaihtimesta eli lauhduttimesta ja höyryst-

timestä (kuva 1). Näitä osia yhdistää putkisto, jossa kylmäaine kiertää. Kylmäaineen olomuoto vaihtelee syklin aikana nesteen ja höyryn välillä. Lämpöpumpun prosessin sykli koostuu neljästä eri vaiheesta: puristuksesta, lauhtumisesta, paisunnasta ja höyrystymisestä.



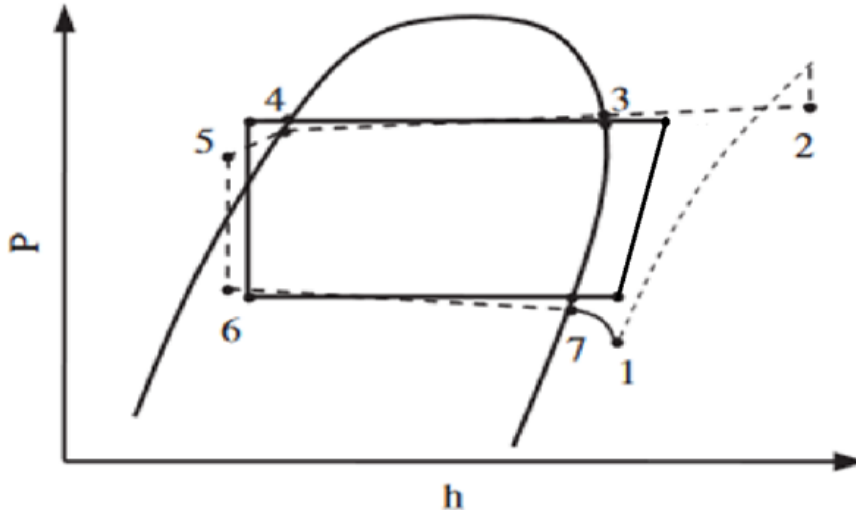
Kuva 1 Lämpöpumpun peruskomponentit ja lämmönsiirron suunta lämmityskäytössä. (muokattu lähteestä Urone & Hinrichs, 2012.)

Kylmäaine saapuu kompressorille matalapaineisena höyrynä. Kompressorissa höyry puristetaan korkeaan paineeseen (kuva 2 $1 \rightarrow 2$). Puristuksessa paineen lisäksi myös höyryn lämpötila nousee, eli höyry tulistuu. Kompressorin jälkeen tulistettu korkeapaineinen höyry saapuu lauhtuttimelle. Lauhtuttimella höyryn lämpötila laskee, kunnes tulistus on poistunut ($2 \rightarrow 3$). Tämän jälkeen kylmäaineen olomuoto muuttuu höyrystä nesteeksi ($3 \rightarrow 4$), minkä jälkeen neste saatetaan vielä alijäähdyttää ($4 \rightarrow 5$).

Höyryn ominaissisäenergia on merkittävästi suurempi kuin nesteen ominaissisäenergia. Olomuodon muutoksessa vapautuu tämän sisäenergian muutoksen verran energiaa lämpönä. Kun lämpöpumpua käytetään rakennuksen lämmittämiseen, tämä lämpöenergia vapautetaan rakennuksen sisäpuolella. Jäähdytyskäytössä lauhtuminen tapahtuu vastavasti rakennuksen ulkopuolella.

Lauhtumisen jälkeen kylmäaine saapuu nestemäisenä paisuntaventtiilille. Paisuntaventtiilissä kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat sekä osa kylmäaineesta muuttuu höyryksi ($5 \rightarrow 6$). Kylmäaine saapuu höyrystimelle kylmänä nesteen ja höyryn seoksena. Höyrystimellä kylmäaineen olomuoto muuttuu kokonaan höyryksi, mikä sitoo lämpöä ympäristöstä ($6 \rightarrow 7$). Lämmönsiirron mahdollistamiseksi kylmäaineen lämpötilan täytyy höyrystimellä olla matalampi kuin lämmönlähteen. Lämmityskäytössä höyrystin sijaitsee rakennuksen ulkopuolella. Höyrystimen jälkeen kylmäaine saapuu taas kompressorille ja sykli alkaa alusta.

Lämpöpumppu voidaan toteuttaa toimimaan kokonaan ilman säätyviä komponentteja, mutta säädettävät komponentit mahdollistavat paremman energiatehokkuuden. Paisunta-venttiili päästää lävitseen vain sen verran kylmäainevirtaa, että kaikki nestemäinen kylmäaine ehtii höyrystyä höyrystimellä. On tärkeää, että kompressorin imuun päätyy pelkästään höyryä, sillä nestepisarat saattavat vaurioittaa kompressoria. Käytännössä tämä varmistetaan tulistamalla kompressoriin tulevaa höyryä hieman (7→1).



Kuva 2 Ideaalinen (yhtenäinen viiva) ja todellinen (katkoviiva) lämpöpumppusykli ph -tasossa. (muokattu lähteestä Selbaş et al., 2006.)

Kylmäaineen tulistus höyrystimellä ja alijäähdytys lauhduttimella lisäävät syklin aikana siirtyvän lämmön määrää. Tulistuksen ja alijäähdytyksen lisääminen vaatii kuitenkin suurempia lämmönvaihtimia, jotka maksavat enemmän. Ideaalisen tulistuksen ja alijäähdytyksen määrän ratkaisu on teknillistaloudellinen optimointitehtävä, jota on tutkinut muun muassa Selbaş et al. (2006). On olemassa myös toimintaperiaatteeltaan erilaisia lämpöpumppuja, kuten absorptiolämpöpumppu, mutta niitä ei käsitellä tarkemmin tässä työssä.

2.3 Ideaalinen lämpöpumppusykli

Lämpöpumppua voidaan pitää lämpövoimakoneen vastakohtana. Lämpövoimakone käyttää lämpöenergiaa tuottaakseen mekaanista työtä, ja lämpöpumppu päinvastaisesti käyttää mekaanista työtä siirtääkseen lämpöä. Ideaalinen lämpövoimakoneen sykli on Carnot'n kierto, ja ideaalinen lämpöpumpun sykli on käänteinen Carnot'n kierto. Tämän päinvastaisuuden vuoksi ideaalisen lämpöpumppusyklin lämpökerroin on vastaavan Carnot'n kierron hyötysuhteen käänteisluku. Koska lämpövoimakoneen hyötysuhde on korkeintaan yksi, on lämpöpumpun lämpökerroin lämmityskäytössä vähintään yksi. Lämpöpumpun teoreettinen maksimilämpökerroin riippuu kaavan 3 mukaisesti lauhtumis- ja höyrystymislämpötilan erosta. Lämpökerroin siis maksimoituu lämpötilaeron ollessa mahdollisimman pieni. Ulkolämpötilaan ei voi vaikuttaa, mutta lämmönlähteen ja lämmönjakotavan voi joissain tapauksissa valita. Lämmönlähteitä ja -jakotapoja käsitellään seuraavissa alaluvuissa.

$$COP_{carnot} = \frac{1}{\eta_{carnot}} = \frac{T_l}{T_l - T_h} \quad (3)$$

missä COP_{carnot} on lämpöpumpun lämpökertoimen teoreettinen maksimiarvo tietyllä lämpötilaerolla, η_{carnot} on lämpövoimakoneen hyötysuhteen teoreettinen maksimiarvo tietyllä lämpötilaerolla, T_l on lämpöpumpun lauhtumislämpötila ja T_h on lämpöpumpun höyrystymislämpötila.

Carnot'n lämpökerroin sisältää useita oletuksia, jotka eivät toteudu todellisissa prosesseissa. Carnot'n kierron puristus on isentrooppinen. Todellisen kompressorin puristus ei ole palautuva eikä myöskään adiabaattinen, sillä osa kompressorin kuluttamasta sähköstä muuttuu lämmöksi tulistaen kylmäaineen. Carnot'n kierrossa lämmönsiirrot ovat isotermissiä eli lämpöä siirtyy vain faasimuunnoksen johdosta. Kaava ei huomioi myöskään virtauksen painehäviöitä, lämmönvaihtimien lämpötilaeroja eikä apulaitteiden sähkönkulutusta. Tämän takia kaavalla 3 saadut arvot ovat todellisia lämpökertoimia suurempia.

Nykyisten lämpöpumppujen todelliset lämpökertoimet ovat kokoluokasta ja lämmönlähteestä riippuen noin 30–70 % saman lämpötilaeron Carnot'n lämpökertoimista. Suuret teollisen kokoluokan lämpöpumput pääsevät lähemmäksi teoreettista maksimiarvoa kuin pienet yksityisasunnoissa käytettävät lämpöpumput. (Zottl et al., 2012) Kaava 3 on kuitenkin käyttökelpoinen arvioimaan lämpötilaeron vaikutusta lämpökertoimeen, sillä todellinen lämpökerroin riippuu lämpötilaerosta samankaltaisesti kuin teoreettinen lämpökerroin. Paremmin todellista lämpöpumppusykliä kuvaa käänteinen Rankine-sykli, joka huomioi entropian kasvun puristuksessa ja paisunnassa (Liite 1).

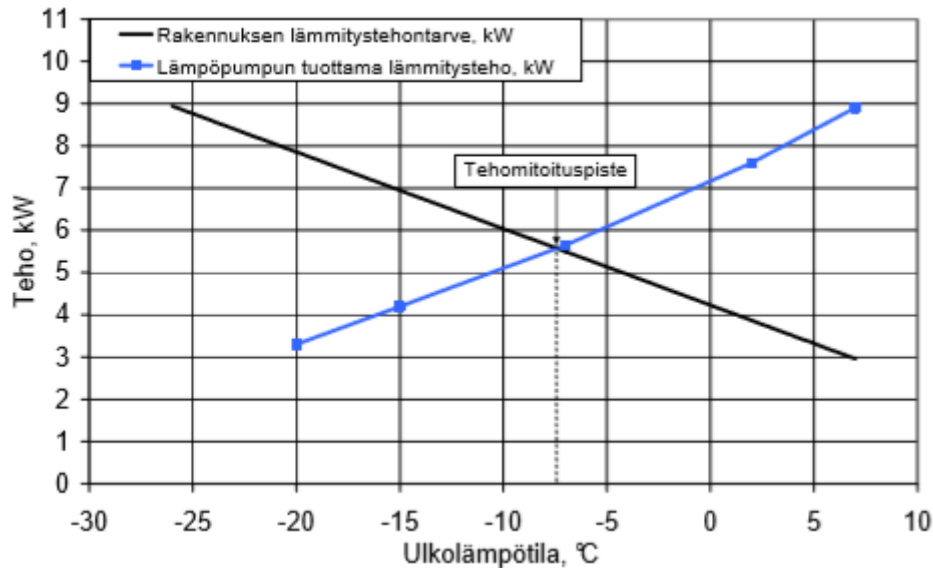
2.4 Lämmönlähteet

Tässä alaluvussa käsitellään lämpöpumpuille käytettyjä eri lämmönlähteitä. Kaikki näistä lämmönlähteistä eivät kuitenkaan ole soveltuvia kerrostalokohteisiin. Kannattavuuslaskelmissa ja muissa osissa tätä kandidaatintyötä käsitelläänkin lämmönlähteistä vain maata ja poistoilmaa, koska ne ovat parhaiten soveltuvat lämmönlähteet taajamissa sijaitseviin kerrostaloihin. Lämmönlähteen tärkeimmät ominaisuudet ovat mahdollisimman korkea lämpötila ja mahdollisuus saada riittävä kapasiteettivirta.

Lämpöpumpuille käytettäviä lämmönlähteitä ovat ulkoilma, maaperä, kallioperä, vesistöt ja rakennuksen oma poistoilma. Maasta voi kerätä lämpöä kahdella eri tavalla: lähellä maanpintaa maaperässä kulkevilla vaakaputkistoilla tai syvälle kallioon poratuilla lämpökaivoilla. Vaakaputkistot vaativat paljon pinta-alaa ja soveltuvat siksi huonosti tiheästi rakennetuille taajama-alueille. Lämpökaivoista kerätty lämpöenergia on pääosin geotermistä energiaa. Ulkoilman, maan pintakerrosten ja vesistöjen lämpö taas on peräisin pääosin auringosta.

Poikkeustapauksissa, kuten prosessiteollisuudessa, saattaa olla käytettävissä hukkalämpöä, jota voidaan käyttää lämpöpumpun lämmönlähteenä. Hukkalämmön lämpötila on luonnon lämmönlähteitä korkeampi, joten hukkalämpöä hyödyntämällä päästään korkeisiin lämpökertoimiin. Asuinrakennuksissa hyödynnettävistä lämmönlähteistä korkein lämpötila on poistoilmalla, mutta sen lisäksi tarvitaan aina myös jokin muu lämmitystapa. Poistoilma on lämpötilaltaan lähes vakio vuoden ympäri, joten poistoilmalämpöpumppu toimii vuoden ympäri suunnilleen samalla lämpökertoimella.

Ulkoilman käyttö rakennuksen ainoana lämmönlähteenä on kuvan 3 mukaisesti ongelmallista kylmässä ilmastossa. Talvella lauhtumis- ja höyrystymislämpötilan ero kasvaa suureksi, ja lämpökerroin on huonoimmillaan lämmityksentarpeen ollessa suurimmillaan. Koska höyrystymislämpötila on matala, kylmäaineen paine täytyy olla pieni. Pienen paineen vuoksi massavirta on pieni, mikä heikentää lämmitystehoa. Höyrystintä saatetaan myös joutua sulattamaan sen jäätyneen vuoksi, mikä myös osaltaan pienentää lämpökerrointa. Sulatus voidaan hoitaa sähkövastuksilla tai kääntämällä prosessin suunta niin, että höyrystin toimii sulatuksen ajan lauhduttimena. Tämän takia ilmalämpöpumppuja käytetään tyypillisesti yhdessä jonkin toisen lämmitystavan kanssa eli osamitoitettuna.



Kuva 3 Ilmalämpöpumpun tuottama lämmitysteho ja rakennuksen lämmitystehontarve ulkolämpötilan funktiona. Tehomitoituspisteen lämpötilaa alemmissa lämpötiloissa lämpöpumppu ei enää pysty tuottamaan rakennuksen tarvitsemää lämmitystehoa. (Ympäristöministeriö, 2012.)

Kuvan 3 lämpöpumppu on mitoitettu lämpötilaan $-7,5\text{ °C}$. Säävyöhykkeellä 1 sijaitsevan täystehomitoitetun lämpöpumpun tehokäyrä leikkaisi rakennuksen lämmitystehontarvetta kuvaavan suoran lämpötilassa -26 °C . Mitoitusta käsitellään seuraavassa luvussa. Ulkoilmalämpöpumppuilla on alin toimintalämpötila, jota kylmemmässä niitä ei voi käyttää. Ympäristöministeriön Lämpöpumppujen energialaskentaoppaassa oletetaan alimman toimintalämpötilan olevan -20 °C (Ympäristöministeriö, 2012).

Maaperä ja pintavedet ovat talvella huomattavasti ulkoilmaa lämpimämpiä. Niiden lämpötila laskee kuitenkin talvisin, mikä huonontaa niitä lämmönlähteenään käyttävien lämpöpumppujen vuotuista lämpökerrointa. Lisäksi käytettäessä pintavettä lämmönlähteenä saattaa ongelmaksi muodostua höyrystimen jäätyminen veden lämpötilan laskiessa nolnaan. Syvälle kallioon poratuissa lämpökaivoissa ja syvällä vesistöissä lämpötila pysyy lähes muuttumattomana vuoden ympäri. Näistä lämmönlähteistä saa siis lämpöä hyvällä lämpökertoimella ympäri vuoden. Vesistö on kuitenkin käytettävissä lämmönlähteenä vain poikkeustapauksissa. Lämpökaivot ovat usein toteutettavissa ja tuottavat korkean vuotuisen lämpökertoimen, mutta ne vaativat suurimmat investoinnit. Taloudellista kannattavuutta käsitellään työn neljännessä luvussa.

2.5 Lämmönjakotavat

Käytettäessä lämpöpumppua rakennuksen tilojen lämmitykseen, lämpöpumppu siirtää lämpöä lämmönlähteestä joko suoraan huoneilmaan tai vesikiertoiseen lämmitykseen. Asuinkerrostaloissa on tyypillisesti vesikiertoinen lämmitys. Vesikiertoisen lämmityksen lämmönjakotapana on joko lämpöpatterit tai lattialämmitys. Lämmityksen vaatiman menoveden lämpötilan määrittää lämmönsiirtopinta-ala. Mitä suurempi lämmönsiirtopinta-ala on, sitä alempi menoveden lämpötila tarvitaan. Lattialämmityksen lämmönsiirtopinta-ala on huomattavasti suurempi kuin lämpöpattereiden. Tästä syystä lattialämmitys on lämpöpumpuille parhaiten sopiva lämmönjakotapa.

Vanhoiden lämpöpattereiden mitoituslämpötilassa vaatima menoveden lämpötila on +70 °C, kun lattialämmitykselle riittää +35 °C menovesi. Osalle lämpöpumpuista +70 °C on liian korkea lämpötila, minkä vuoksi lähellä mitoittavaa ulkolämpötilaa joudutaan käyttämään lisälämmitystä kuten sähkövastuksia. Lämmönjakotapa vaikuttaa siis merkittävästi vaadittuun lauhtumislämpötilaan ja täten saavutettuun lämpökertoimeen. Yleisin lämmönjakotapa kerrostaloissa on kuitenkin lämpöpatterit, eikä lämmönjakotapaa yleensä enää rakentamisen jälkeen muuteta. Lämpöpumppua voidaan käyttää myös lämmittämään käyttövetä, jonka lämpötila on +55 – +65 °C. (Laitinen et al., 2014.)

2.6 Kylmäaineet

Kylmäaineeksi kutsutaan ainetta, joka kiertää lämpöpumpun putkistossa. Lämpöpumpun siirtämä lämpöenergia siirtyy kylmäaineen välityksellä. Kylmäaineen täytyy höyrystyä ja tiivistyä prosessin aikana, joten matala höyrystymislämpötila on kylmäaineelle tärkeä ominaisuus. Muita kylmäaineelle tärkeitä ominaisuuksia ovat suuri höyrystymislämpö, tiheys, korroosion aiheuttamattomuus, ympäristöystävällisyys, palamattomuus sekä tarpeeksi korkea kriittisen pisteen lämpötila ja paine. Ei ole olemassa täydellistä kylmäainetta, vaan kylmäaineen valinta on aina kompromissi eri osatekijöiden välillä.

Mitä suurempia kylmäaineen höyrystymislämpö ja tiheys ovat, sitä enemmän lämpöä saadaan siirrettyä tilavuusvirtaa kohden. Kriittistä pistettä korkeammassa lämpötilassa tai paineessa fluidi muuttuu olomuodoltaan ylikriittiseksi fluidiksi. Kriittisen pisteen yläpuolella ei ole erikseen neste- ja kaasufaaseja. Ylikriittisen fluidin höyrystymislämpö on nolla eikä faasimuunnokseen perustuva energian siirto ole mahdollista.

Kylmäaineina on käytetty perinteisesti CFC-yhdisteitä, jotka koostuvat kloorista, fluorista ja hiilestä. CFC-yhdisteistä on pyritty luopumaan niiden aiheuttaman otsonikerroksen ohenemisen vuoksi. CFC-yhdisteistä on siirrytty HFC-yhdisteihin eli fluorihilivetyihin. HFC-yhdisteet eivät tuhoa otsonikerrosta, mutta ne ovat jopa tuhat kertaa hiilidioksidia pahempia kasvihuonekaasuja. Ilmaston lämpenemisen vuoksi HFC-yhdisteet tulisi korvata ympäristöystävällisemmällä vaihtoehdoilla kuten hiilivedyillä. (Harby, 2017.)

3 Mitoitus ja sähköntarve

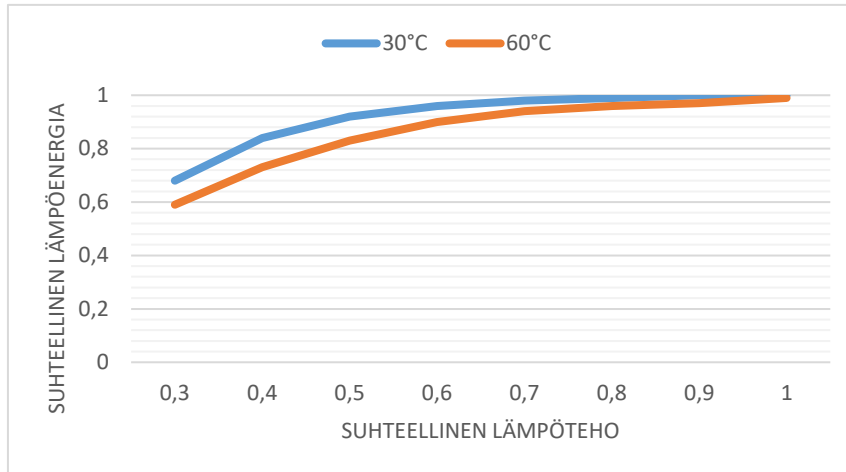
Tässä luvussa käsitellään maa- ja poistoilmalämpöpumppujen mitoitusta ja sähköntarvetta. Sähköntarvetta käsitellään vuosittaisen sähköenergian kulutuksen sekä hetkellisen huipputehontarpeen näkökulmasta. Olennaisia mitoitukseen liittyviä käsitteitä ovat mitoituslämpötila, suhteellinen lämpöteho ja suhteellinen lämpöenergia. Saneerauskohteissa lämpöpumpun mitoitus perustuu rakennuksen toteutuneeseen lämmitysenergian kulutukseen. Mitoituksen perusongelma on vuotuisen lämmöntarpeen epätasainen jakauma. Tammikuussa lämmöntarve on suuri, kun taas heinäkuussa lämmitystä tarvitaan tyypillisesti vain käyttövetä varten (Liite 2).

Tehomitoituspiste tarkoittaa alinta ulkolämpötilaa, jossa lämpöpumpun tuottama lämpöteho riittää kattamaan rakennuksen lämmitystehontarpeen. Täystehomitoitettu lämpöpumppu pystyy tuottamaan rakennuksen tarvitseman lämmitystehon rakentamismääräysten mukaisessa mitoittavassa ulkolämpötilassa. Säävyöhykkeellä 1 mitoittava ulkolämpötila on -26 °C . Ilmatieteenlaitoksen (2018) Energianlaskennan testivuoden ulkoilman lämpötilan pysyvyysarvojen mukaan säävyöhykkeellä 1 vuoden tunneista 0,08 % on kylmempää kuin -20 °C . Täystehomitoitetun lämpöpumpun täyttä tehoa tarvitaan siis todella harvoin.

Täystehomitoituksen ongelma on myös, että rakennuksen lämmitystehontarve kasvaa lineaarisesti ulkolämpötilan laskiessa, ja lämpöpumpun lämpökerroin pienenee ulkolämpötilan laskiessa. Ilmiö korostuu käytettäessä lämpöpattereita ja lämpöpumppuja, joiden lämmönlähde seuraa ulkolämpötilaa. Pienimmillään ongelma on lämmitysratkaisuissa, joissa lämpö kerätään syvältä maasta porakaivoilla ja jaetaan rakennuksessa lattialämmityksellä.

Lämpöpumpun suhteellisella lämpöteholla tarkoitetaan lämpöpumpun lämpötehon suhdetta rakennuksen lämmitystehontarpeeseen mitoittavassa ulkolämpötilassa. Suhteellinen lämpöteho ilmoitetaan yleensä prosenttilukuna. Täystehomitoitetun lämpöpumpun suhteellinen lämpöteho on 100 %. Osatehomitoitetun lämpöpumpun suhteellinen lämpöteho on vähemmän kuin 100 %, eli osatehomitoitetun lämpöpumpun lisäksi tarvitaan jokin toinen lämmitystapa lämpötehon riittävyyden turvaamiseksi kylmissä lämpötiloissa.

Lämpöpumpun suhteellisella lämpöenergian tuotolla tarkoitetaan lämpöpumpun vuoden aikana tuottaman lämpöenergian suhdetta rakennuksen vuotuisen lämmitysenergiatarpeeseen. Myös suhteellinen lämpöenergia ilmoitetaan yleensä prosenttilukuna. Täystehomitoitetun lämpöpumpun suhteellinen lämpöenergian tuotto on 100 %. Koska erittäin kylmät lämpötilat ovat melko harvinaisia, osatehomitoitettujen maalämpöpumppujen suhteelliset lämpöenergian tuotot lähestyvät sataa prosenttia jo melko pienillä suhteellisilla lämpötehoilla (Kuva 4).



Kuva 4 Maalämpöpumpun tuottama suhteellinen lämpöenergia suhteellisen lämpötehon funktiona kahdella eri menoveden maksimilämpötilalla. Kuvaajat on piirretty Ympäristöministeriön (2012) Lämpöpumppujen energialaskentaoppaan aineiston perusteella.

Tässä työssä tarkasteltavia lisälämmitysvaihtoehtoja ovat kaukolämpö ja sähkövastukset. Se kumpi näistä on kannattavampaa, riippuu lämpöpumpun mitoituksesta. Pienellä suhteellisella lämpöteholla on todennäköisesti kannattavampaa käyttää kaukolämpöä, sillä kaukolämpö on halvempaa kulutettua megawattituntia kohti. Kun kulutus on suurta, lisälämmityksen muuttuva kustannus ratkaisee. Suurella suhteellisella lämpöteholla lisälämmitystä tarvitaan harvoin, joten kiinteät kustannukset ovat muuttuvia kustannuksia tärkeämmät. Koska sähkövastukset ovat suhteellisen halpoja, saattaa tässä tapauksessa olla kannattavaa purkaa kaukolämpöliittymä ja tuottaa lisälämmitys omilla sähkövastuksilla. Näin vältetään kaukolämmön kiinteiltä kustannuksilta kuten tehomaksuilta, joita veloitetaan liittymän käyttöasteesta riippumatta. Suhteellisen lämpötehon pienentäminen pienentää rakennuksen lämmityksen vuotuista lämpökerrointa, sillä lisälämmityksen lämpökerroin on yksi.

3.1 Maalämpöpumput

Maalämpöjärjestelmän täystehomitoitus on yleensä teknisesti mahdollista toteuttaa, joten maalämpöjärjestelmän mitoitus on taloudellinen optimointiongelma. Optimaalinen mitoitus riippuu lämpökaivojen porauskustannuksista, lämpöpumpun ja lisälämmityksen investointi- ja kunnossapitokustannuksista, lämpökertoimesta sekä energian hinnoista. Maalämpöpumppujen suhteellinen lämpöteho on yleensä välillä 60–100%.

Optimaalista mitoitusta voidaan pyrkiä ratkaisemaan simuloimalla. Oksanen (2015) ratkaisi simuloimalla optimaalisen lämmitystavan lattialämmitteiselle asuinkerrostalolle Espoossa. Optimaaliseksi lämmitystavaksi saatiin maalämpöjärjestelmä, jonka suhteellinen lämpöteho on 80 %. St1 Lähienergia Oy (2017) toteutti Espooseen 1960-luvulla rakennettuun kerrostaloyhtiöön maalämpöratkaisun, jonka suhteellinen lämpöteho on noin 85 %. Ratkaisu on toteutettu ostoenergiamalla, jossa St1 omistaa järjestelmän ja myy lämpöä taloyhtiölle. Myös Helsingissä sijaitseva vuonna 1956 rakennettu asuinkerrostalo siirtyi maalämpöön vuonna 2018. Maalämpöjärjestelmän mitoituspiste on -20 °C , mikä vastaa 80–90 prosentin suhteellista lämpötehoa. (Helsingin Uutiset, 2018.) Maalämpöpumppujen vuotuiset lämpökertoimet ovat lämmönjakotavasta riippuen 2,3–3,5 (Ympäristömi-

nisteriö, 2012). Tyypillisellä 80–90 prosentin suhteellisella lämpöteholla ja lämpökertoimella 3 rakennuksen vuotuisesta lämmityksentarpeesta noin kolmasosa tuotetaan sähköllä ja kaksi kolmasosaa saadaan maasta.

Maalämpöpumppujärjestelmän mitoitus koostuu kahdesta osasta: lämpökaivojen mitoituksesta ja lämpöpumpun mitoituksesta. Lämpöpumpun lämmönkeruunesteestä ottamaa tehoa rajoittaa lämpökaivoissa kiertävän lämmönkeruunesteen lämpötilan alenema. Lämmönkeruunesteen paluulämpötila ei saa olla pitkään alle 0 °C tai kaivo saattaa jäätyä. Alimitoitettu lämpökaivo saattaa tehdä järjestelmän käyttökelvottomaksi. Osat tulisi olla mitoitettu oikeassa suhteessa, ettei kummassakaan ole myöskään hukkaan menevää ylikapasiteettia. Ylikapasiteetti ei ole vahingollista, mutta ylimääräinen poraaminen tai liian suuren lämpöpumpun hankinta aiheuttaa lisäkustannuksia. Lämpökaivoista saatavaa lämpötehoa ei kuitenkaan voi tietää varmaksi etukäteen.

Lämpökaivoista saatavan lämmitystehon suuruus riippuu kaivojen syvyydestä, määrästä, kallioperän ominaisuuksista sekä usean lämpökaivon tapauksessa niiden sijoittelusta toisiinsa nähden. Kaivojen syvyys vaikuttaa kaivoista palaavan lämmönkeruunesteen lämpötilaan, sillä kallion lämpötila kasvaa syvemmälle mentäessä. Lämpötehoon vaikuttaa myös kallioperän lämmönjohtavuus ja aktiivisyvyys. Aktiivisyvyydellä tarkoitetaan syvyyttä, joka on pohjaveden pinnan alapuolella vuoden ympäri. Matala aktiivisyvyys on toivottava asia, sillä lämpö siirtyy paremmin vedestä kuin kalliosta. Huonoin paikka lämpökaivoille on soraharju. Pääsääntöisesti lämpökaivoista saatava energiamäärä pienenee Suomessa mentäessä pohjoiseen päin. Kallioperän ominaisuudet saattavat kuitenkin poiketa toisistaan merkittävästi myös lähellä toisiaan olevien kohteiden välillä. Tampereen eteläpuolella yksittäisestä lämpökaivosta saa noin 110–130 kWh/m vuodessa. Pohjois-Suomessa vastaava luku on 70–90 kWh/m. (Gebwell, 2018.)

Pientaloissa on tyypillisesti vain yksi lämpökaivo. Kerrostalo vaatii useampia lämpökaivoja, jolloin puhutaan lämpökaivokentistä. Lähellä toisiaan sijaitsevat lämpökaivot jäädyttävät toisiaan ja täten heikentävät niistä saatavaa vuotuista lämpöenergian määrää. Liian lähelle toisiaan sijoitetuista lämpökaivoista saatava lämpö vähenee vuosien saatossa tai pahimmassa tapauksessa kaivot saattavat jopa jäätyä. Oikein mitoitettukin lämpökaivokenttä jäähtyy käytössä, mutta pysyy käyttökelpoisena rakennuksen käyttöänsä ajan. Jäähtymistä voidaan vähentää käyttämällä lämpökaivoa kesäisin jäähdytykseen, jolloin kaivoon siirretään lämpöä. (Gebwell, 2018.)

3.2 Poistoilmalämpöpumput

Poistoilmalämpöpumpulla tarkoitetaan lämpöpumppua, joka käyttää lämmönlähteenään rakennuksen koneellisen ilmanvaihdon poistoilmaa ja hyödyntää sitä rakennuksen tilojen sekä mahdollisesti myös käyttöveden lämmitykseen. On olennaista huomioida poistoilmalämpöpumpun ja passiivisen poistoilman lämmöntalteenoton ero. Passiivisella poistoilman lämmöntalteenotolla esilämmitetään tuloilmaa lämmönvaihtimen avulla eikä se sisällä lämpöpumppua. Poistoilmalämpöpumpulla poistoilmasta saadaan kerättyä enemmän lämpöä ja sillä voidaan tuottaa myös lämmintä käyttövettä. Poistoilmalämpöpumppua voidaan siis hyödyntää myös kesällä, jolloin tilojen lämmitystä ei tarvita.

Potentiaalisimpia kohteita poistoilmalämpöpumpuille ovat suuret 1960–1990-luvulla rakennetut asuinrakennukset. Merkittävä osa Suomen rakennuskannasta on rakennettu tällä

aikavälillä. Vuoden 2002 jälkeen rakennetuissa rakennuksissa täytyy rakentamismääräysten mukaan olla poistoilman lämmöntalteenotto. Verrattuna vanhoihin rakennuksiin uusissa rakennuksissa suurempi osuus lämpöhäviöistä aiheutuu ilmanvaihdosta paremman lämpöeristyksen vuoksi. Olemassa oleva passiivinen lämmöntalteenotto kuitenkin vähentää poistoilmalämpöpumpulla saavutettavaa hyötyä, minkä vuoksi poistoilmalämpöpumpulla on saavutettavissa suuremmat säästöt vanhemmissa rakennuksissa. (Rämä et al., 2015.)

Maa- ja poistoilmalämpöpumppujen mitoitus eroaa toisistaan oleellisesti. Poistoilmalämpöpumpun tehoa rajoittaa fysiikan lait, sillä lämmönlähteen kapasiteettivirta on rajallinen. Koska rakennuksesta häviää lämpöä muutenkin kuin poistoilman mukana eikä poistoilmasta ole ikinä mahdollista saada kaikkea lämpöenergiaa kerättyä talteen, poistoilmalämpöpumppu on aina osatehoinen. Poistoilmalämpöpumpun voidaankin ajatella olevan enemmänkin energiansäästötoimenpide kuin vaihtoehtoinen lämmitystapa. Tyypillisesti lämmöntalteenottojärjestelmän hyötysuhteen kasvattaminen kasvattaa myös järjestelmän hintaa. Poistoilmalämpöpumpun kannattavuus riippuu säästetyin lämmitysenergian hinnasta, sähkön hinnasta, lämpökertoimesta sekä järjestelmän investointi- ja kunnossapitokustannuksista.

Rämän et al. (2015) mukaan poistoilmalämpöpumpulla voidaan vähentää kaukolämmön kulutusta noin 40–70 %. Keskimäärin poistoilmalämpöpumpun avulla voidaan laskea kaukolämmön kulutus noin puoleen. Poistoilmalämpöpumppujen lämpökertoimet ovat välillä 2–4, tyypillisesti noin 3,5. Tyypillisillä arvoilla poistoilmalämpöpumpua käytettäessä rakennuksen lämmityksentarpeesta 50 % tuotetaan kaukolämmöllä, 14 % sähköllä ja 36 % saadaan talteen poistoilmasta.

3.3 Järjestelmänäkökulma

Talokohtaiset lämmitysjärjestelmät vähentävät kaukolämmön kulutusta ja täten kaukolämmön tuottajan tuloja. Kun kiinteistöjä poistuu kaukolämmön piiristä, kaukolämmön tuotannon ja jakelun kiinteät kustannukset jäävät pienemmän kuluttajamäärän jaettavaksi. Tämä aiheuttaa nousupainetta kaukolämmön hintaan, mikä tekisi talokohtaisista lämmitysjärjestelmistä entistä kannattavimpia. Kestäisi kuitenkin vuosia, että lämpöpumput yleistyisivät järjestelmän kokonaisuuden kannalta merkittävässä määrin.

Rämä et al. (2015) arvioi, että poistoilmalämpöpumput voisivat pitkällä aikavälillä realistisesti vähentää kaukolämmön kulutusta 2,7 TWh vuodessa, mikä vastaa noin 7 % kaukolämmön kulutuksesta. Tämä vähennys lisäisi sähkönkulutusta noin 0,8 TWh. Maasta on saatavissa teoriassa riittävästi lämpöä koko Suomen rakennuskannan lämmöntarpeeseen, mutta käytännössä maalämpö on toteutettavissa vain osalle rakennuksista. Toteutuksen saattaa estää esimerkiksi tontin alla kulkevat putket tai se ettei tontilla ole riittävästi tilaa energiakaivoille. Saneerauskohteissa ongelmaksi saattaa muodostua myös lämpöpumppujärjestelmän sijoittaminen kiinteistöön. Lämpöpumppuratkaisuja myyvä yritys Leasegreen (2019) arvioi, että Helsingissä noin kolmasosa rakennuskannasta voisi siirtyä maalämpöön. Kaukolämmön markkinaosuudeksi jäisi siis edelleen 60–70 %.

Kaukolämmön tuottajan ja kuluttajan välillä vallitsee eturistiriitoja myös lämmitysratkaisujen kytkentään liittyen. Jos rakennuksessa on samaan aikaan käytössä lämpöpumppu sekä kaukolämmitys, lämmönlähteet voidaan kytkeä joko sarjaan tai rinnan. Rinnanky-

kennässä molemmat lämmönlähteet toimivat samalla lämpötilaerolla eli lämmittävät lämmönjakelujärjestelmästä palaavaa vettä vaadittuun menoveden lämpötilaan. Tällöin lämpöpumppu joutuu toimimaan melko suurella lämpötilaerolla, mikä on epäedullista lämpökertoimen kannalta.

Kun kaukolämmönvaihdin ja lämpöpumppu ovat kytkettynä sarjaan, lämpöpumpulla esilämmitetään kaukolämmönsiirtimelle menevää vettä. Tällöin lämpöpumppu toimii pienemmällä lämpötilaerolla ja täten paremmalla lämpökertoimella, mikä on kuluttajan kannalta optimaalista. Sarjaankytkentä kuitenkin nostaa kaukolämpöveden paluulämpötilaa, mikä on epäedullista kaukolämmön tuottajan näkökulmasta. (Rämä et al., 2015.)

Yleisesti ottaen toimiva dynaaminen systeemi on sellainen, missä yksittäisten toimijoiden maksimoidessa omaa hyötyään myös koko systeemi päätyy optimaaliseen tilaan. Kaukolämpöjärjestelmässä tämä voidaan toteuttaa antamalla kuluttajalle oikeanlaisia hintasignaaleja, milloin järjestelmän toiminta optimoituu markkinaehtoisesti. Voikin olla, että lämpöpumppujen yleistyessä kaukolämmön hinnoitteluperusteisiin lisätään jokin kaukolämpöveden jäähtymästä riippuva komponentti. Päästöjen kannalta olisi toivottavaa, että koko järjestelmä toimisi optimaalisella tavalla.

4 Taloudellinen kannattavuus

Tässä luvussa tarkastellaan maa- ja poistoilmalämpöpumppuinvestointien taloudellista kannattavuutta kaukolämmitteisiin asuinkerrostaloihin. Lämpöpumppuinvestointien taloudellinen kannattavuus määritetään vertaamalla lämpöpumppuratkaisun kustannuksia vaihtoehtokustannukseen. Tämän työn laskelmissa vaihtoehtokustannus on kaukolämmityksessä pysyminen. Kustannuksia lämpöpumppuinvestoinnin ja kaukolämmön välillä vertaillaan lämpöpumppujärjestelmän oletetun käyttöiän ajalta. Kannattavuuden selvitykseen käytetään nykyarvomenetelmää, jossa tulevaisuudessa syntyvät kustannukset diskontataan nykyhetkeen. Lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuus riippuu investointi- ja kunnossapitokustannuksista, sähkön ja kaukolämmön hinnoista, laskentakorosta sekä lämpöpumppujärjestelmän käyttöiästä. Laskentakorko vastaa vaadittua pääoman tuottoa. Vaadittu pääoman tuotto on sitä suurempi, mitä suuremmaksi investoinnin riski arvioidaan. Taloudellisten tekijöiden lisäksi myös ympäristönäkökulma saattaa olla joissain tapauksissa merkittävä päätöksentekokriteeri.

Uuteen rakennukseen lämmitystapaa valittaessa lämpöpumppujärjestelmien kannattavuutta parantaa kaukolämpöverkkoon liittymismaksulta välttyminen. Tässä työssä käsiteltävissä vanhoissa rakennuksissa liittymismaksu on jo maksettu, mutta vanhat rakennukset kuluttavat enemmän lämmitysenergiaa huonomman energiatehokkuutensa vuoksi. Suuremmasta kulutuksesta on mahdollista saavuttaa suuremmat kustannussäästöt, mikä parantaa lämpöpumppuinvestointien kannattavuutta vanhoissa rakennuksissa. Rakennuksen kaukolämmönjakokeskus joudutaan tyypillisesti uusimaan rakennuksen käyttöiän aikana. Kaukolämmönjakokeskuksen uusiminen maksaa rakennuksen koosta riippuen tuhansista euroista kymmeneen tuhansiin euroihin. Kaukolämmönjakokeskuksen tullessa käyttöikänsä päähän on hyvä ajankohta tarkastella eri lämmitysvaihtoehtoja, kun investointeja joudutaan joka tapauksessa tekemään.

4.1 Sähkön ja kaukolämmön hinnat

Lämpöpumppujen taloudellinen kannattavuus johtuu kahdesta syystä: lämmönlähteestä kerättävä lämpö on ilmaista ja lämpöpumppu siirtää lämmönlähteestä enemmän lämpöä suhteessa kulutettuun sähköön. Lämmönsiirron täytyy olla sähkönkulutusta suurempaa, koska sähkö maksaa kuluttajalle tyypillisesti enemmän kuin kaukolämpö. Kaukolämpö maksoi vuoden 2018 3. vuosineljänneksellä pienkerrostalolle keskimäärin 79,67 €/MWh ja sähkö 135 €/MWh (Tilastokeskus, 2018c).

Keskimääräinen ostetun sähkön hinta on korkeampi kuin edullisimpien tällöin tarjolla olleiden sähkösopimusten hinnat, koska useat kuluttajat eivät kilpailuta sähkösopimuksiin. Vuoden 2018 alussa kiinteähintaista sähköä olisi saanut 35 MWh vuosikulutuksella kahden vuoden määräaikaisella sopimuksella noin hintaan 116 €/MWh. Vuoden loppuun mennessä määräaikaisten sopimusten hinnat nousivat tasolle 134 €/MWh sähkön markkinahinnan nousun takia. Toistaiseksi voimassa olevien sopimusten hinnat ovat 10–20 €/MWh korkeampia kuin määräaikaisten. Edellä mainitut hinnat ovat koko maan keskiarvoja. (Energiavirasto, 2019.)

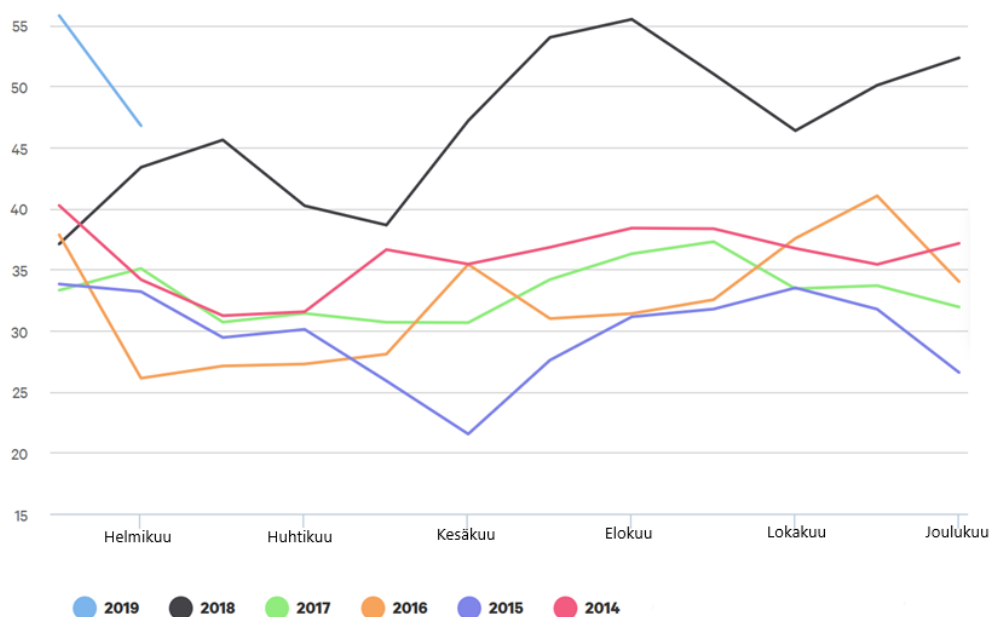
Sähkön markkinahinnan kuukausikeskiarvot olivat pysyneet suhteellisen vakaina viime vuosina, kunnes sähkön hinta nousi vuonna 2018 (Kuva 5). Sähkön hinta on huomattavan

volatiili verrattuna kaukolämmön hintaan. Kaukolämmön hinnassa ei ole vastaavia äkkinaisiä muutoksia, mutta toisaalta kaukolämmön hinnat ovat pelkästään nousseet viime vuosina. 2000-luvun aikana kaukolämmön hinta on kaksinkertaistunut (Kuva 6).

Sähkön ja kaukolämmön hinnat riippuvat vuosikulutuksesta, joten paljon kuluttavalle suurelle taloyhtiölle energian hinnat megawattituntia kohden saattavat olla edullisemmat. Suuret kuluttajat saavat edullisempia räätälöityjä sopimuksia, mutta Energiavirasto ei tilastoi niitä. Sähkön ja kaukolämmön välinen hintaero on hyvin olennainen tekijä lämpöpumpuinvestointien kannattavuuden kannalta. Edellä mainitulla sähkön hinnalla 135 €/MWh ja kaukolämmön hinnalla 79,67 €/MWh lämpökertoimen täytyy olla suuruudeltaan vähintään 1,7, että lämmityksen muuttuva kustannus olisi lämpöpumpulla edullisempi. Vastaavasti sähkön hinnalla 110 €/MWh lämpökertoimen täytyisi olla vähintään 1,4. Kun otetaan huomioon lämpöpumpun investointi- ja kunnossapitokustannukset, täytyy lämpökertoimen olla suurempi taloudellisen kannattavuuden saavuttamiseksi.

Ympäristöministeriön (2012) Lämpöpumpujen energialaskentaoppaan mukaan säävyöhykkeellä 1 maalämpöpumpun tyypillinen vuotuinen lämpökerroin vaihtelee välillä 2,3–3,5 lämmönjakotavasta riippuen. Poistoilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on tyypillisesti välillä 1,9–2,4. Ympäristöministeriön oletus poistoilmalämpöpumpun lämpökertoimesta vaikuttaa melko konservatiiviselta. Rämän et al. (2015) mukaan tyypillinen vuotuinen lämpökerroin poistoilmalämpöpumpulle on noin 3,5. Poistoilmalämpöpumpun investointikustannukset ovat maalämpöä pienemmät, joten se maksaa itsensä takaisin matalammallakin lämpökertoimella.

Sähkön hinta koostuu kolmesta eri osasta, jotka ovat sähköenergia, sähkönsiirto ja verot. Sähköstä maksetaan arvonlisäveroa ja sähköveroa. Sähköenergian osuus hinnasta on suurin piirtein 40 prosenttia ja siirron sekä verojen molempien noin 30 prosenttia. Kuluttaja pystyy vaikuttamaan näistä kolmesta vain sähköenergian hintaan. Sähköenergiaa myydään erilaisilla tariffeilla, joita ovat esimerkiksi yleissähkö, aikasähkö ja markkinahintainen Spot-sähkö.



Kuva 5 Nord Pool -sähköpörssin Suomen aluehinnan (€/MWh) kuukausikeskiarvot viime vuosilta. (muokattu lähteestä Nord Pool, 2019)

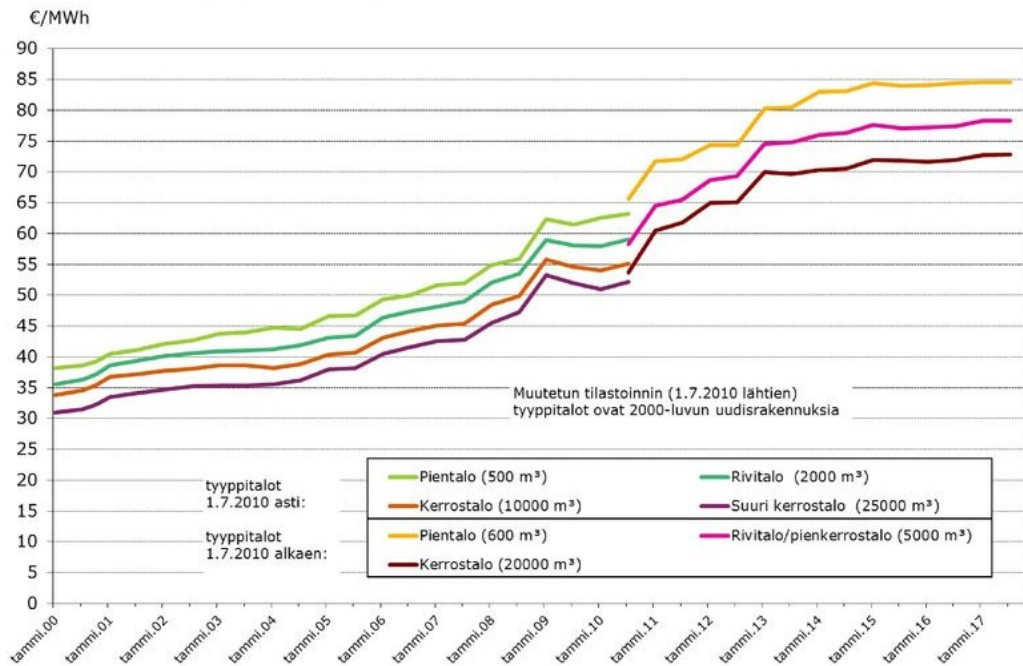
Yleissähkön hinta on aina sama ja aikasähkön hinta vaihtelee sopimuksen mukaisesti vuorokaudenajan mukaan. Vuoden 2018 alussa yleissähköä sai kahden vuoden määräaikaisella sopimuksella hintaan 38 €/MWh (alv 0%) vuosikulutuksen ollessa 35 MWh. Vuoden loppuun mennessä määräaikaisten sopimusten hinnat nousivat tasolle 50 €/MWh. Aikasähkösopimuksissa yön tuntien hinta on yleensä päivän hintaa halvempi. Käyttäessään yleis- tai aikasähköä kuluttaja on turvassa äkilliseltä sähkön markkinahinnan nousulta mutta ei pääse hyötymään, mikäli hinta laskee. Pitkällä aikavälillä myös kiinteähintaiset tuotteet seuraavat markkinahinnan muutosta. Spot-sähkön hinta määräytyy Nord Pool -sähköpörssissä kysynnän ja tarjonnan mukaan. Vuoden 2018 veroton keskiarvohinta oli 46,80 €/MWh ja vuoden 2017 33,19 €/MWh (Nord Pool, 2019).

Kuluttaja ei kuitenkaan voi ostaa sähköä suoraan pörssistä. Sähkøyhtiöt myyvät kuluttajille pörssihintaista sähköä, mutta veloittavat siitä välityspalkkion. Välityspalkkiot ovat suuruusluokaltaan 1,5–3 €/MWh. Spot-hinta määritellään tällä hetkellä tunnin tarkkuudella, tulevaisuudessa mahdollisesti tarkemmin. Seuraavan vuorokauden tuntien hinnat määräytyvät edellisenä päivänä kello 13 Suomen aikaa (*engl. day-ahead market*). Fyysisen sähkön pörssi kauppa käydään aina toimitusta edellisenä päivänä. Sähkøpörssissä käydään kauppaa myös erilaisilla johdannaisilla kuten futuureilla. Mikäli rakennuksessa on kysyntäjouston mahdollistavaa sähkön tai lämmön varastointikapasiteettia, voidaan spot-sähköä käytettäessä säästää siirtämällä kulutusta kalliimmilta tunneilta halvemmille. Tämän työn laskelmissa käytetään kuitenkin kiinteähintaista yleissähköä yksinkertaisuuden vuoksi.

Sähkøenergian tuottajan kuluttaja saa valita vapaasti, mutta siirtohinta riippuu siitä minkä jakeluyhtiön alueella rakennus sijaitsee. Sähkønsiirtoyhtiöllä on aina alueellinen monopoli. Siirtoyhtiö ei kuitenkaan voi korottaa siirtohintoja mielivaltaisesti, vaan yhtiö saa tehdä Energiaviraston määrittelemän kohtuullisen määrän voittoa. Sähkön siirtohintoja on viime vuosina nostanut siirtoyhteysien maakaapelointi. Sähkön verottomat siirtohinnat ovat yhtiöstä riippuen noin 25–45 €/MWh. Edullisinta sähkønsiirto on Uudellamaalla ja kalleinta Itä-Suomessa. (Energiavirasto, 2019.)

Sähkøveron suuruus määräytyy kulutuskohteen mukaan. Asuinkerrostalot maksavat veroluokan 1 sähkøveroa, jonka suuruus on tällä hetkellä 22,53 €/MWh sisältäen huoltovarmuusmaksun. Teollisuus saa sähköä asuinrakennuksia pienemmällä sähkøverolla. Arvonlisävero on 24 % loppusummasta, eli myös sähkøverosta maksetaan arvonlisäveroa. (Verohallinto, 2019.) Sähkön suhteellisen korkea verotus heikentää lämpöpumppuinvestointien kannattavuutta. Rakennusten uusiutuvan energian käyttöä voitaisiin lisätä siirtämällä lämpöpumput alempaan sähkøveroluokkaan.

Kaukolämmön hinta, teho+energiamaksu €/MWh (sis. verot)



Kuva 6 Kaukolämmön hintakehitys 2000-luvulla. (Energiateollisuus, 2018a)

Toisin kuin sähköllä, kaukolämmön tuottaja hoitaa myös jakelun. Kaukolämpöyhtiöllä on alueellinen monopoli, eikä kuluttaja voi vaikuttaa kaukolämmön hintaan. Kaukolämmön hinta koostuu energia- ja tehomaksusta. Osalla kaukolämpöyhtiöistä energiamaqsut ovat kausihinnoiteltu esimerkiksi vuodenajoittain kesä-, syys-, talvi- ja kevätkausiin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että talvella energiamaqsu on kallein ja kesällä halvin. Kaukolämmön hinta on erisuuruinen eri kunnissa. Kaukolämpö on halvempaa kunnissa, joissa sitä tuotetaan pääosin yhteistuotantovoimaitoksissa ja kalliimpaa kunnissa, joissa sitä tuotetaan pääosin pelkästään lämpöä tuottavissa lämpökeskuksissa. Pääsääntöisesti kaukolämpö on edullisempaa suuremmissa kunnissa. (Energiateollisuus, 2018b.) Talo-kohtainen lämmitysjärjestelmä on luonnollisesti sitä kannattavampi, mitä enemmän kaukolämpö maksaa. Lämpöpumpuinvestoinnin kannattavuus riippuu siis rakennuksen sijainnista ilmaston lisäksi myös sähkön siirtohintojen ja kaukolämmön hinnan vuoksi.

Kun tehdään pitkäaikaista energiainvestointia, ollaan kiinnostuneita energian hinnoista tulevaisuudessa. Erinäisten tahojen tekemiin ennusteisiin tulee suhtautua lähdekriittisesti tahojen omat edut huomioiden. Sähköenergia on edellä mainituista hinnoista ainut, jonka hinta määräytyy markkinoilla. Nasdaq OMX Commodities -raaka-ainepörssissä käydään kauppaa johdannaisilla kuten sähköfutuureilla. Futuuri on sopimus tulevaisuudessa tehtävästä kaupasta. Sähköfutuuria voidaan pitää markkinoiden ennusteena sähkön tulevaisuuden hinnasta. Markkinaosapuolia ovat esimerkiksi sähkön tuottajat sekä suuret sähkön kuluttajat kuten puunjalostus- ja metalliteollisuus. Taloyhtiön kokoluokan sähkönkuluttajat eivät tyypillisesti käytä johdannaisia sähkönhankintansa optimointiin, mutta futuurien hinnoista voi arvioida sähkön tulevaisuuden hintakehitystä. Markkinat ennustavat sähkön hinnan laskevan tämän hetken tasosta. Helmikuussa 2019 olisi saanut ostettua sähköä vuodelle 2020 hintaan 42 €/MWh ja vuodelle 2021 hintaan 37 €/MWh (Nordic Green Energy, 2019.).

Kaukolämmön hinnassa tulee olemaan nousupainetta monissa kunnissa lähitulevaisuudessa, kun kaukolämmöntuotannon hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään. Kivihiiltä käyttävät kaukolämpöyhtiöt joutuvat tekemään suuria investointeja korvataksaan poistuvan tuotantokapasiteetin, kun kivihiilen käyttö kielletään Suomessa. Vuonna 2017 kivihiilellä tuotettiin 23 prosenttia Suomen kaukolämmöstä (Energiateollisuus, 2018a). Osalla hiilivoimaloista olisi vielä teknistä käyttöikää jäljellä tätä kauemmaksi. Ennenaikaiset investoinnit aiheuttavat tuottajille taloudellisen rasitteen, mikä tulee todennäköisesti näkymään kaukolämmön kuluttajahinnoissa. Pöyryn (2018) tekemän selityksen mukaan ennenaikaisesti poistettavien voimalaitosten nykykäyttöarvot ovat poistohetkellä 50 miljoonaa euroa.

Todennäköisin korvaaja hiilivoimaloille on biopolttolaitokset. Biopolttolaitokset käyttävät polttoaineenaan metsäpolttoaineita, teollisuuden puutähteitä tai muuta biomassaa. Vuonna 2017 biopolttolaitoksilla tuotettiin 33 prosenttia kaukolämmöstä (Energiateollisuus, 2018a). Uudet biopolttolaitokset tulevat kasvattamaan biopolttolaitosten kysyntää, minkä voi olettaa nostavan biopolttolaitosten hintoja. Tähän mennessä biopolttolaitoksia ei ole verotettu, mutta kivihiiltä on. Kun kivihiilen käyttö lopetetaan, verot täytyy kerätä jostain muualta, mikä saattaa tarkoittaa biopolttolaitosten verollepanoa. Mahdollinen biopolttolaitosten hintojen nousu kasvattaisi siis tuotantokustannuksia myös biopolttolaitoksia jo valmiiksi käyttävissä kunnissa, vaikka niissä ei tarvita uusia investointeja.

Mikäli kivihiiltä korvataan maakaasulla, tulee sekin nostamaan kaukolämmön tuotantohintoja, sillä maakaasu on kivihiiltä kalliimpi polttoaine. Investointipäätökset kivihiilen korvaamiseksi on tehtävä pian, joten biopolttolaitoksia tai maakaasua edullisempien ratkaisujen ilmaantuminen on epätodennäköistä. Kaukolämmön ennakoitua hintakehitystä voi pitää talokohtaisia lämpöpumppuratkaisuja puoltavana tekijänä.

4.2 Kannattavuuslaskelmat

Energiainvestointien kannattavuuden arviointiin käytettäviä menetelmiä ovat takaisinmaksuajan menetelmä, nykyarvomenetelmä ja annuiteettimenetelmä. Takaisinmaksuajan voidaan laskea joko korottomana tai korollisena. Koroton takaisinmaksuajan menetelmä saada karkea arvio investoinnin kannattavuudesta, mutta sitä ei kannata käyttää investointipäätöksen perusteena. Menetelmä puutteena on, ettei se huomioi rahan aika-arvoa eikä takaisinmaksun jälkeistä aikaa. Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnin käyttöänsä aikana syntyneet kustannukset ja tuotot siirretään nykyhetkeen eli diskontataan (kaava 4). Nykyarvon tulkinta on, että nykyarvoltaan positiivinen investointi kannattaa toteuttaa. Annuiteettimenetelmässä investoinnin tuotot ja kulut siirretään yhtä suureksi vuosieriksi investoinnin käyttöänsä ajalle. Nykyarvomenetelmän ja annuiteettimenetelmän antamat lopputulokset sisältävät saman informaation. Tässä työssä käytetään takaisinmaksuajan menetelmää ja nykyarvomenetelmää. Nykyarvojen laskemiseen käytetään kaavaa 4. (Siren, 2015.)

$$P = \sum_{k=1}^n \frac{T_k}{(1+i)^k} - \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+i)^k} - I_0 + \frac{S}{(1+i)^n} \quad (4)$$

missä P on nykyarvo, n on investoinnin käyttöikä, i on laskentakorko, T_k on vuoden k tuotot, K_k on vuoden k kulut, I_0 on alkuinvestointi ja S on jäännösarvo.

Energiainvestointien nykyarvoja voidaan laskea kahdella eri tavalla. Jos lasketaan yksittäiselle investoinnille nykyarvo, kaavan 4 ensimmäinen summatermi jää pois, sillä lämmitys ei tuota mitään, vaan siitä aiheutuu pelkästään kuluja. Jos taas tarkastellaan lämpöpumppuinvestoinnin aiheuttamaa muutosta aiempiin lämmityskuluihin, voidaan säästö lämmityskuluissa tulkita tuotoksi. Tässä työssä käytetään jälkimmäistä laskentatapaa, ja jäännösarvo oletetaan nolaksi. Laskentakorkona käytetään arvoa 2,5 %. Lisäksi laskentakorolle suoritetaan herkkyystarkastelu Discount rates in energy system analysis -tutkimuksen suosittelmalla 7 % laskentakorolla (Steinbach & Staniaszek, 2015).

Energiainvestoinnit ovat pitkäikäisiä, joten olennainen osa kannattavuuslaskelmia on epävarmuus tulevaisuudesta. Kannattavuuslaskelmia tehdessä tiedetään yleensä vain investointikustannus, sen hetkinen korkotaso sekä sen hetkiset sähkön ja kaukolämmön hinnat. Investoinnin käyttöikä, vuotuinen lämpökerroin, kunnossapitokustannukset ja tulevaisuuden hinnat joudutaan arvioimaan. Oletukset ovatkin merkittävässä osassa laskelmia tehdessä. Koska suurin osa kassavirtalaskelman eristä on tekijän päätettävissä, voi kannattavuuslaskelmia tehdä tarkoituksenhakuisesti ja saada haluamansa lopputuloksen. Kannattavuuslaskelmia tulee siis tarkastella lähdekritiittisesti laskelmien tekijöiden omat intressit huomioiden.

Oletuksia laskelmiin on saatavissa viranomaislähteistä kuten Ympäristöministeriön (2012) Lämpöpumppujen energialaskentaoppaasta sekä Euroopan standardointikomitean (2017) standardista EN 15459-1:2017 ”Energy performance of buildings. Economic evaluation procedure for energy systems in buildings”. Lämpöpumppujen energialaskentaoppaasta löytyy esimerkiksi tyypillisiä lämpöpumppujen vuotuisia lämpökertoimia säävyöhykkeittäin. Standardissa oletetaan lämpöpumpun käyttöikäksi 15–20 vuotta ja vuotuisiksi kunnossapitokustannuksiksi 2–4 % lämpöpumpun hankintakustannuksesta.

Lämpöpumppujaratkaisuja myyvillä yrityksillä on omia laskentaoletuksiaan. Esimerkiksi Oksanen (2015) käyttää kannattavuuslaskelmissaan Lämpöyökkösen oletuksia, joissa uuden asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän vuosittaisen kunnossapitokustannuksen oletetaan olevan 500 € ja kompressorin vaihdon kustannuksen olevan 5 000 € joka kymmenes vuosi. Laskelmien tarkastelujakson pituus on 30 vuotta. Laskelmien perusteella maalämpö on kaukolämpöä kannattavampi lämmitystapa Espooseen rakennettavaan asuinkerrostaloon.

Paiho et al. (2017) olettavat artikkelissaan uuteen kerrostaloon tehtävän maalämpöpumppujärjestelmän vuosittaisten kunnossapitokustannusten olevan 1 % hankintakustannuksesta. Kunnossapitokustannusten lisäksi järjestelmän uusintakustannuksen oletetaan olevan 25 000 € 15 vuoden välein. Käytetyn tarkastelujakson pituus on 25 vuotta, jonka jälkeen järjestelmän jäännösarvon oletetaan olevan 50 % hankintakustannuksesta. Jäännösarvon jättäminen laskelmiin on perusteltua, sillä oikein mitoitettut lämpökaivot ovat hyvin pitkäikäisiä. Laskelmien perusteella lämmitys maalämpöpumpulla maksaa 178 €/m²/25a ja kaukolämmöllä 219 €/m²/25a. Uusien talojen ominaisenergiakulutukset ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä kuin vanhojen, joten näistä laskelmista ei voi tehdä suoria johtopäätöksiä koskien vanhoja taloja.

4.3 Asunto Oy Kivelänkatu 1 b, Helsinki

Asunto Oy Kivelänkatu 1 b on ensimmäinen maalämpöön siirtynyt asuinkerrostalo Helsingin kantakaupungissa. Taloyhtiössä on 19 asuntoa. Vuonna 1934 rakennettu taloyhtiö siirtyi maalämpöön keväällä 2012. Lämmitystavan tarkastelu tuli ajankohtaiseksi, kun taloyhtiön kaukolämmönjakokeskus tuli käyttöikänsä päähän. Jakokeskuksen uusiminen olisi maksanut noin 20 000 euroa, eikä sillä olisi saavutettu lainkaan energiansäästöä. Lisäksi kaukolämmön hinta oli noussut viime vuosina ja hinnankorotusten epäiltiin jatkuvan. Tässä alaluvussa esitetyt tiedot perustuvat Asunto Oy Kivelänkatu 1 b:n (2019) kotisivuillaan antamiin tietoihin.

Päätös siirtyä maalämpöön tehtiin vuonna 2010. Tuolloin tehtyjen kannattavuuslaskelmien perusteella maalämpöön siirtymällä arvioitiin säästävän 40 % vuotuisissa lämmityskustannuksissa. Taloyhtiön vieressä sijaitsee identtinen asuinkerrostalo, joka on pysynyt kaukolämmössä. Molempien talojen vuotuinen lämmityksentarve on noin 172 MWh. Lämpöpumpun suhteellinen lämpöenergian tuotto on noin 99 %, mikä vastaa noin 90 % suhteellista lämpötehoa. Tarvittava lisälämmitys tuotetaan sähkövastuksilla. Vertaamalla talojen toteutuneita lämmityskustannuksia voidaan tarkastella kannattavuuslaskelmien luotettavuutta ja maalämmön kannattavuutta verrattuna kaukolämpöön Helsingissä.

Investointi maksoi 72 746 euroa, josta saatiin 15 % valtion energia-avustusta. Taloyhtiön maksettavaksi jäi siis 61 834 €. Lisäksi kaukolämpöliittymän purku maksoi 1 000 €. Investointia varten otettiin 10 vuoden tasalyhenteinen laina. Laskelmissa oletettiin reaalkoroksi 1,5% ja laskettiin vaihtoehdoille nykyarvot. Lainaa lyhennettiin 6 770€ vuodessa. Vuosittaisiksi huoltokustannuksiksi oletettiin maalämmölle 270 € ja kaukolämmölle 250 €. Lisäksi oletettiin, että pumput tulee uusia 20 vuoden välein, mikä maksaa 2 500 €. Oletetut kunnossapitokustannukset vaikuttavat melko optimistisilta verrattuna edellisessä alaluvussa mainittuihin.

Sähkön hinnan oletettiin nousevan vuonna 2012 12 %. Kaukolämmön hinnan osalta tarkasteltiin kahta eri skenaariota: yhteensä 22 % hinnankorotusta vuosina 2010–2011 ja yhteensä 46 % hinnankorotusta vuosina 2010–2012. Nykyarvot laskettiin 10–30 vuoden tarkasteluajanjaksoille. Laskelmien perusteella maalämpöön siirtyminen kannattaa kaikissa eri skenaarioissa. 10 vuoden tarkastelujaksolla maalämpöön siirtymällä laskettiin säästävän 8 000–23 000 € kaukolämmön hintaskenaariosta riippuen. 20 vuoden tarkastelujaksolla laskettiin säästävän 82 000–117 000 € ja 30 vuoden tarkastelujaksolla 171 000–228 000 €.

Kaukolämmöllä taloyhtiön vuotuinen ostoenergian ominaiskulutus oli 91 kWh lämmitettävää bruttoneliometriä kohti. Maalämpöön siirtymisen jälkeen ostoenergian ominaiskulutus on 35 kWh/brm²/a. Kulutus vastaa maalämpöpumpun vuotuista lämpökerrointa 2,6, eli taloyhtiön lämmöntarpeesta noin 62 % saadaan maasta ja 38 % tuotetaan sähköllä. Kannattavuuslaskelmien arvio on toteutunut melko hyvin. Vuosina 2013–2018 taloyhtiö on säästänyt lämmityskustannuksissa vuosittain 37–51 % verrattuna identtiseen naapuritaloon. Vuosittaisten säästöjen eroja selittää vuosien keskilämpötilojen erot sekä sähkön ja kaukolämmön hinnanmuutokset. Keskimäärin taloyhtiö on säästänyt lämmityskustannuksissa vuodessa 43 %, mikä vastaa noin 5 560 euroa. Vuoden 2018 loppuun mennessä säästöä oli kertynyt noin 37 500 euroa. Keskimääräisellä toteutuneella säästöillä inves-

toinnin koroton takaisinmaksuaika on 11,3 vuotta. Säästöt ovat kuitenkin lainanlyhennyksiä pienempiä, eli todellisuudessa investointi alkaa maksaa itseään takaisin vasta kun laina on maksettu pois. Mikäli taloyhtiöllä ei ole varallisuutta, on yhtiövastiketta täytynyt nostaa lainanlyhennyksiä varten.

Kun ei oteta huomioon kaukolämmönjakokeskuksen uusimista, maalämmön vuosien 2012–2018 kustannusten nykyarvo vuoden 2018 loppuun diskontattuna 2,5 % korolla on 9 000 € enemmän kaukolämpöön verrattuna. Jos oletetaan kustannusten pysyvän ennallaan, tällöin maalämpöjärjestelmä maksaisi itsensä takaisin vuonna 2024. Tällöin sen takaisinmaksuaika olisi noin 12 vuotta ja säästö 20 vuoden ajalta noin 30 000 €.

Kun huomioidaan, että kaukolämmössä pysyminen olisi vaatinut 20 000 € investoinnin, maalämpöön siirtyminen on huomattavasti kannattavampaa. Jos maalämmön vuosittainen säästö pysyisi aiemmassa noin 5560 eurossa, 10 vuoden tarkastelujaksolla maalämpöön siirtymisellä säästäisi noin 10 000 € käytettäessä 2,5 % laskentakorkoa. Säästö vastaa alkuperäisen kannattavuuslaskelman arvioita. 20 vuoden tarkastelujaksolla säästäisi noin 53 000 € ja 30 vuoden tarkastelujaksolla noin 89 000 €. 7 % laskentakorolla vastaavat arvot ovat 15 000 €, 46 000 € ja 62 000 €. Nämä säästöt ovat vähemmän kuin alkuperäisen kannattavuuslaskelman arvot, mutta investointi vaikuttaa olevan silti huomattavan kannattava. Mahdollinen kaukolämmön hinnan nousu parantaisi investoinnin kannattavuutta entisestään.

4.4 Asunto Oy Vuorikilpi, Jyväskylä

Jyväskylässä sijaitseva Asunto Oy Vuorikilpi on 1978 rakennettu 60 asunnon taloyhtiö. Taloyhtiön hallitus päätti vuonna 2012 asentaa kiinteistöön poistoilmalämpöpumpun. Tässä alaluvussa esitetyt tiedot perustuvat Jäspi LTO:n (2016) ja taloyhtiön isännöitsijän antamiin tietoihin (Kuulasmaa, 2019). Investointi maksoi 120 000 €, ja se rahoitettiin lainalla. Poistoilmalämpöpumppu otettiin käyttöön tammikuussa 2013. Ennen poistoilmalämpöpumpun käyttöönottoa taloyhtiön kaukolämmön kulutus oli noin 770 MWh vuodessa. Käyttöönoton jälkeen kulutus on vähentynyt noin 50 %.

Poistoilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin on ollut noin 4, eli se on kuluttanut noin 96 MWh sähköä vuodessa. Täten taloyhtiön lämmöntarpeesta noin 50 % on tuotettu kaukolämmöllä, 12 % sähköllä ja 38 % on saatu talteen poistoilmasta. Lämmityskustannuksissa on säästetty vuodessa noin 30 % eli noin 17 000 €. Tällä vuosisäästöllä investoinnin koroton takaisinmaksuaika on noin 7 vuotta. Lainan lyhennykset on maksettu lämmityksessä syntyneillä säästöillä, joten osakkailta ei ole peritty lisävastikkeita. Vuoden 2017 lopussa lainaa oli jäljellä 26 770 €.

Jäspi LTO arvioi, että As Oy Vuorikilpi säästäisi poistoilmalämpöpumpulla yhteensä 331 000 €, kun järjestelmän käyttöikäksi oletetaan 25 vuotta. Jos oletetaan vuosittaisen säästön pysyvän 17 000 eurossa, saadaan investoinnin nykyarvoksi noin 227 000 € diskontattuna vuoden 2018 loppuun 2,5 % laskentakorolla ja oletettaessa järjestelmän käyttöikäksi 25 vuotta. Vastaavasti 10 vuoden tarkastelujaksolla nykyarvoksi saadaan noin 37 000 €. 7 % laskentakorolla nykyarvot ovat noin 11 000 € 10 vuoden tarkastelujaksolla ja 129 000 € 25 vuoden tarkastelujaksolla. Säästöt ovat pienempiä kuin Jäspin arvioimat, mutta investointi vaikuttaa laskelmien perusteella silti kannattavalta. Jäspin laskelma perustuu todennäköisesti oletukseen kaukolämmön hinnankorotuksista lähitulevaisuudessa, mitä voidaan pitää perusteltuna.

5 Yhteenveto

Kaukolämmön hinta on kaksinkertaistunut Suomessa 2000-luvun aikana ja hinnankorotusten voi odottaa jatkuvan, kun kivihiilen käyttö kielletään Suomessa sähkön ja lämmön tuotannossa vuonna 2029. Rakennusten lämmitykseen kuluu merkittävä osa koko Suomen energian loppukäytöstä. Tehokas tapa vähentää rakennusten ostoenergiankulutusta ja lämmityksen päästöjä on lämpöpumput. Suurin energiansäästöpotentiaali on 1960-1990-luvulla rakennetuissa asuinkerroistaloissa, joiden ominaisenergiankulutukset ovat varsin suuria. Kun taloyhtiön kaukolämmönjakokeskus tulee käyttöikänsä päähän, on hyvä ajankohta tarkastella vaihtoehtoisia lämmitystapoja.

Lämpöpumppujen avulla voidaan siirtää lämpöä rakennukseen sen ympäristöstä tai poistoilmasta. Lämpöpumppujen kannattavuus perustuu niiden ominaisuuteen siirtää enemmän lämpöä verrattuna lämpöpumpun kuluttamaan sähköön. Lämpökerroin kuvaa siirretyn lämmön suhdetta kulutettuun sähköön. Lämpöpumppujen lämpökertoimet ovat tyypillisesti noin 2–4. Maalämpöpumpulla voidaan vähentää lämmityksen ostettavan energian määrää noin 60–70 % ja poistoilmalämpöpumpulla noin 30–40 %. Lämmityskustannukset eivät kuitenkaan pienene samassa suhteessa, sillä sähkö maksaa kuluttajalle enemmän kuin kaukolämpö.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia maa- ja poistoilmalämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta ja mitoitusta rakentamismääräysten mukaisilla säävyöhykkeillä 1-3 sijaitseviin asuinkerrostaloihin. Käytettyjä tutkimusmenetelmiä olivat kirjallisuustutkimus ja esimerkkikohteiden kulutustietojen perusteella tehtävät laskelmat.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella maalämpöpumpun optimaalinen suhteellinen lämpöteho asuinkerrostalolle on 80–90 % rakennuksen tehontarpeesta mitoituslämpötilassa, jolloin suhteellinen lämpöenergian tuotto on 95–100 % rakennuksen vuotuisesta lämmitysentarpeesta. Koska erittäin kylmät lämpötilat ovat harvinaisia, lämpöpumpun täystehomitoitus ei ole taloudellisesti kannattavaa. Osatehomitoitetun lämpöpumpun vaatima lisälämmitys voidaan tuottaa joko sähkövastuksilla tai kaukolämmöllä. Maalämpöön siirtäessä on yleensä kannattavaa purkaa kaukolämpöliittymä ja tuottaa tarvittava lisälämmitys sähkövastuksilla. Sähkö on kalliimpaa kuin kaukolämpö, mutta sähkövastukset ovat suhteellisen halpoja ja näin vältetään kaukolämmönjakokeskuksen uusimiselta. Poistoilmalämpöpumpulla voidaan vähentää lämmönkulutus noin puoleen, jolloin kaukolämmössä pysyminen on vielä kannattavaa. Poistoilmalämpöpumppu onkin enemmänkin energiansäästötoimenpide kuin vaihtoehtoinen lämmitystapa.

Kirjallisuustutkimus puolsi lämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta. Esimerkkikohteina työssä olivat vuonna 2012 maalämpöön siirtynyt Helsingissä sijaitseva taloyhtiö ja vuonna 2013 poistoilmalämpöpumpun hankkinut Jyväskylässä sijaitseva taloyhtiö. Esimerkkikohteissa investoinneilla on saavutettu noin 30–50 % vuosittaiset säästöt lämmityskustannuksissa. Toteutuneiden kulutustietojen perusteella laskettujen nykyarvojen mukaan molemmat investoinnit vaikuttavat kannattavilta. Koska oletukset ovat tärkeässä osassa elinkaarikustannuksia laskettaessa, laskelmille suoritettiin herkkyystarkasteluja. Herkkyystarkastelut eivät vaikuttaneet investointien kannattavuuteen. Lämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta puoltaa myös lämpöpumppuratkaisuja myyvien yritysten tarjoamat ostoenergiamallit, joissa myyjä kantaa investoinnin riskin.

Lähteet

Alsaqoor, S. & Alqdah, K. S. (2014). Performance of a Refrigeration Absorption Cycle Driven by Different Power Sources. *Smart Grid and Renewable Energy*. [Verkkolehti]. Vol. 5:7. S. 161-169. [Viitattu 15.2.2019]. ISSN 2151-4844. Saatavissa: DOI: 10.4236/sgre.2014.57015.

Asunto Oy Kivelänkatu 1 b. (2018). Asunto Oy Kivelänkatu 1 b:n kotisivut. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.3.2019]. Saatavissa: <http://www.navea.net/maalampo.html>.

Energiateollisuus. (2018a). Kaukolämpötilasto 2017. 70 s. ISSN 0786-4809. Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolampotilasto.html#material-view.

Energiateollisuus. (2018b). Kaukolämmön hintatilasto. [verkkoaineisto]. [viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html#material-view.

Energiateollisuus. (2019). Sähköntuotanto energialähteittäin 2018. [verkkoaineisto]. [viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/sahkontuotanto.

Energiavirasto. (2019). Hintatilastot. [verkkoaineisto]. [viitattu 12.3.2019]. Saatavissa: <http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs>.

Harby, K. (2017). Hydrocarbons and their mixtures as alternatives to environmental unfriendly halogenated refrigerants: An updated overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [Verkkolehti]. Vol. 73. S. 1247-1264. [Viitattu 17.2.2019]. ISSN 1364-0321. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.rser.2017.02.039.

Helsingin seudun ympäristöpalvelut. (2018). Kaukolämpö pääkaupunkiseudulla. [verkkoaineisto]. [viitattu 8.2.2019]. Saatavissa: <https://hri.fi/data/fi/dataset/kaukolampo-paakaupunkiseudulla>.

Helsingin Uutiset. (2018). Maalämpöön siirtynyt kerrostalo ja energiayhtiö kiistelevät – "Kaukolämpö kallistuu, kun Helen luopuu hiilestä". [verkkoaineisto]. [viitattu 28.2.2019]. Saatavissa: <https://www.helsinginuutiset.fi/artikkeli/691574-maalampoon-siirtynyt-kerrostalo-ja-energiayhtio-kiistelevat-kaukolampo-kallistuu>.

Ilmatieteenlaitos. (2018). Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. [verkkoaineisto]. [viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>.

Jäsppi LTO. (2016). Asiakaskokemukset. [verkkoaineisto]. [viitattu 12.4.2019]. Saatavissa: <http://www.jaspilto.fi/asiakaskokemukset.php>.

Kuulasmaa, I. (2019). Taloyhtiöiden kulutustietoja. Jyväskylä: Keski-Suomen Tilivalvonta Oy.

Laitinen, A. & Tuominen, P. & Holopainen, R. & Tuomaala, P. & Jokisalo, J. & Eskola, L. & Sirén, K. (2014). Renewable energy production of Finnish heat pumps: Report of the SPF-project. Espoo: VTT. 126 s. ISBN 978-951-38-8141-2. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T164.pdf>.

Leasegreen. (2019). Kaukolämpö vai maalämpö. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.3.2019]. Saatavissa: <https://leasegreen.fi/aineisto/kaukolampo-vai-maalampo/>.

Nord Pool. (2019). Day-ahead prices. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Monthly/?view=chart>.

Nordic Green Energy. (2019). Sähkön johdannaiset. [verkkoaineisto]. [viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://www.nordicgreen.fi/yrityksille/hintahistoria/>.

Oksanen, H. (2015). Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän optimointi uudis- ja korjausrakentamiskohteissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo. 105 s.

Paiho, S. & Pulakka, S. & Knuuti, A. (2017). Life-cycle cost analyses of heat pump concepts for Finnish new nearly zero energy residential buildings. *Energy and Buildings*. Vol. 150. S. 396-402. [Viitattu 19.3.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.06.034.

Pöyry Management Consulting Oy (2018). Kivihiilen käytön kieltämisen vaikutusten arviointi. Raportti työ- ja elinkeinoministeriölle. 35 s. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/2132296/Selvitys_%2B%2BKivihiilen%2Bkielt%C3%A4misen%2Bvaikutukset/8fb510b4-cfa3-4d9f-a787-0a8a4ba23b5f/Selvitys_%2B%2BKivihiilen%2Bkielt%C3%A4misen%2Bvaikutukset.pdf.

Rämä, M. & Niemi, R & Similä, L. (2015). Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Asiakasraportti. Espoo: VTT. Vol. VTT-CR-00564-15. 93 s. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>.

Selbaş, R. & Kizilkan, Ö. & Şencan, A. (2006). Thermoeconomic optimization of subcooled and superheated vapor compression refrigeration cycle. *Energy*. [Verkkolehti]. Vol. 31:12. S. 2108-2128. [Viitattu 19.2.2019]. ISSN 0360-5442. Saatavissa: DOI: 10.1016/j.energy.2005.10.015.

SFS-EN 15459-1:2017. (2017). Energy performance of buildings. Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. Part 1: Calculation procedures, Module M1-14 2017. Bryssel: Euroopan standardointikomitea. 50 s.

Siren, K. (2015). Rakennusten energiainvestointien kannattavuuden laskenta. Espoo: Aalto-yliopisto. 31 s. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/153118/mod_resource/content/1/Rakennusten%20energiainvestointien%20kannattavuus_2015_highlighted.pdf.

Steinbach, J & Staniaszek, D. (2015). Discount rates in energy system analysis. Bryssel: Buildings Performance Institute Europe. 15 s. Saatavissa: http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Discount_rates_in_energy_system-discussion_paper_2015_ISI_BPIE.pdf.

St1 Lähienergia Oy. (2017). Tarjousesittely As Oy Niittykumpu 3.

Tilastokeskus. (2018a). Asumisen energiankulutus [verkkoaineisto]. [viitattu: 9.2.2019]. ISSN 2323-3273. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2017/asen_2017_2018-11-22_tie_001_fi.html.

Tilastokeskus. (2018b). Rakennukset ja kesämökit. Liitetaulukko 3. Rakennukset lämmitysai- neen mukaan 1970-2017. [verkkoaineisto]. [Viitattu 9.2.2019]. ISSN 1798-677X. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/rakke/2017/rakke_2017_2018-05-25_tau_003_fi.html.

Tilastokeskus. (2018c). Energian hinnat 2018, 3. vuosineljännes. [verkkoaineisto]. [viitattu: 7.3.2019]. ISSN 1799-7984. Saatavissa: <http://www.stat.fi/til/ehi/2018/03/index.html>.

Työ- ja elinkeinoministeriö. (2019). Kivihiilen energiakäytön vuonna 2029 kieltävä laki voimaan huhtikuun alussa. [verkkoaineisto]. [viitattu: 3.4.2019]. Saatavissa: https://valtioneuvosto.fi/artikkeli/-/asset_publisher/1410877/kivihiilen-energiakayton-vuonna-2029-kieltava-laki-voimaan-huhtikuun-alussa.

Urone, P. P. & Hinrics, R. (2012). *College Physics*. Houston, USA: Rice University. 1407 s. ISBN 1938168003 (painettu). ISBN 1-947172-01-8 (sähköinen).

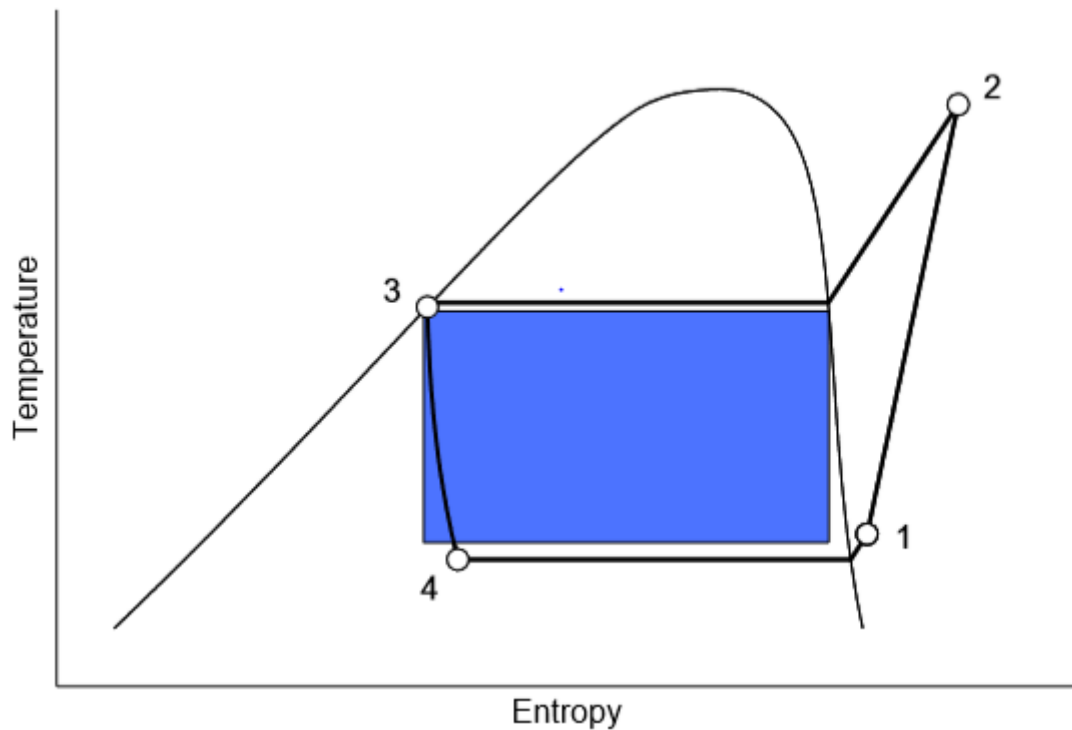
Verohallinto. (2019). Sähkön ja eräiden polttoaineiden verotaulukot. [verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2019]. Saatavissa: https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/sahko_ja_eraat_polttoaineet/sahkon_ja_eraiden_polttoaineiden_verota/.

Ympäristöministeriö. (2012). Lämpöpumppujen energialaskentaopas. 54 s. Saatavissa: <https://www.ymp.fi/download/noname/%7B10A732A6-EA2F-45F9-869C-6F909138CB26%7D/30757>.

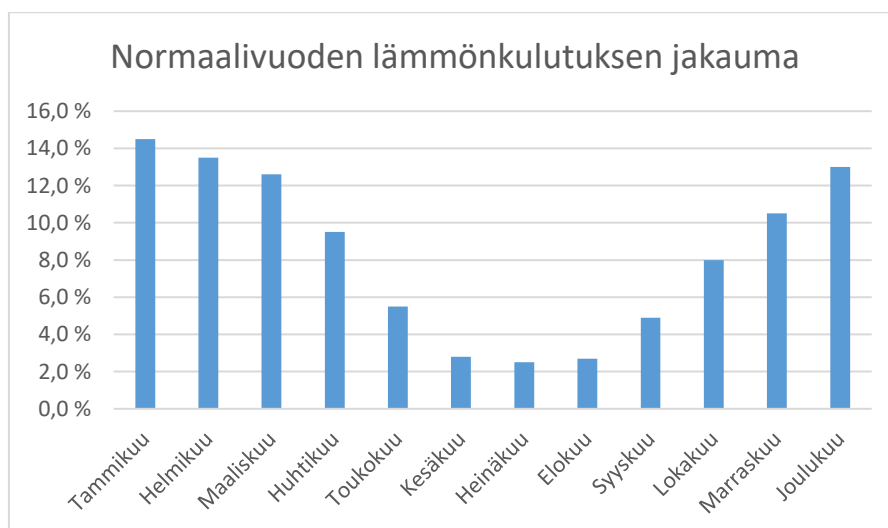
Zehnder, M. (2004). Efficient air-water heat pumps for high temperature lift residential heating, including oil migration aspects. Väitöskirja. Swiss Federal Polytechnical University. Lausanne, Sveitsi. 245 s. Saatavissa: DOI: 10.5075/epfl-thesis-2998.

Zottl, A. & Nordman, R. & Miara, M. (2012). Benchmarking method of seasonal performance. The IEE project SEPOMO-Build. Euroopan komissio. 20 s. Saatavissa: https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/sites/iee-projects/files/projects/documents/sepomo-build_benchmarking_seasonal_performance_of_hp_en.pdf.

Liitteet



Liite 1 Käänteisen Rankine-syklin ja Carnot-syklin lämpötila entropian funktiona (Zehnder, 2004)



Liite 2 Asuinrakennuksen tilojen ja käyttöveden vuotuisen lämmityksentarpeen jakauma kuukausille Suomen ilmastossa. Diagrammi on piirretty Energiateollisuuden (2018a) aineiston perusteella.