

Poistoilmaenergian hyödyntäminen lämpöpumppujärjestelmässä

Ville Hirvonen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014

Energiatekniikan koulutusohjelma
Tekniikan ja liikenteen ala



JYVÄSKYLÄN AMMATTIKORKEAKOULU
JAMK UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Tekijä(t) Hirvonen, Ville	Julkaisun laji Opinnäytetyö	Päivämäärä 28.05.2014
	Sivumäärä 41	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty (X)
Työn nimi POISTOILMAENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN LÄMPÖPUMPPUJÄRJESTELMÄSSÄ		
Koulutusohjelma Energiatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Isometsä, Juha, lehtori Fonselius, Jaakko, yliopettaja		
Toimeksiantaja(t) Mestari toiminta Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön aiheena on poistoilmaenergian hyödyntäminen lämpöpumppujärjestelmässä. Työn toimeksiantaja on Järvenpäässä toimiva Mestari toiminta Oy. Mestari toiminnan palveluihin kuuluvat muun muassa uusien kohteiden rakentamis- ja rakennuttamispalvelut.</p> <p>Tavoitteena työssä oli tutkia Järvenpäähän rakennettavan päiväkotin lämmitysjärjestelmää. Työssä selvitettiin poistoilmaenergian määrä ja sen hyödyntämismahdollisuudet, sillä saatavat säästöt ja paras mahdollinen järjestelmän kytkentävaihtoehto. Lisäksi työssä tehtiin energiakustannusvertailu lämpöpumppujärjestelmän ja kaukolämpöjärjestelmän välillä. Työssä poistoilmalla tarkoitetaan sitä poistoilmaa, jota ei voi määräyksien mukaan käyttää tuloilman esilämmitykseen.</p> <p>Työn tuloksena saatiin, että tässä kohteessa poistoilmasta saadaan hyödynnettyä noin 14 kW:n teho lämmitysjärjestelmään. Säästönä se tarkoittaa noin 13 000 euron investointisäästöjä. Lisäksi kustannusvertailussa tulokseksi saatiin, että lämpöpumppujärjestelmän energiakustannussäästöt ovat noin 400 000 euroa 15 vuoden aikana verrattuna kaukolämpöjärjestelmän energiakustannuksiin.</p>		
Avainsanat (asiasanat) hukkalämpö, lämmön talteenotto, lämpöpumppujärjestelmä, energiatehokkuus, ilmanvaihto		
Muut tiedot		



Author(s) Hirvonen, Ville	Type of publication Bachelor's Thesis	Date 28052014
	Pages 41	Language Finnish
		Permission for web publication (X)
Title TITLE		
Degree Programme USING THE WASTE HEAT ENERGY IN THE HEAT PUMP SYSTEM		
Tutor(s) Isometsä, Juha, senior lecturer Fonselius, Jaakko, principal lecturer		
Assigned by Mestaritoiminta Oy		
Abstract <p>This thesis is about using the waste heat energy in the heat pump system. The thesis has been done to company called Mestaritoiminta Oy, which is located in Järvenpää. The company offers, for example, construction services to the city of Järvenpää.</p> <p>The aim of this thesis was research the heating system of the nursery called Polle. The main subject was to solve how much there is waste heat energy and which are the opportunities to use it. After solving the amount of the waste heat energy the amount of the investment savings were calculated. The next step was to research the best coupling for the system. Also there is made the energy cost comparison between the heat pump system and the district heat system. In this thesis the waste heat energy means that kind of waste heat which can't be used in the ventilation system for pre-heating the fresh air.</p> <p>The results were that there is the power of 14 kW which can be used to the heat pump system. That means the investment savings are 13 000 euros. The energy cost comparison gave the result that the heat pump system is about 400 000 euros cheaper than the district heat system. The comparison time was 15 years.</p>		
Keywords waste heat, heat recovery, heat pump system, energy efficiency, ventilation		
Miscellaneous		

Sisältö

1 Johdanto	3
1.1 Lähtökohdat	3
1.2 Tavoitteet, menetelmä ja rajaukset	4
2 Mestaritoiminta Oy	5
3 Päiväkoti Polle	6
4 Lämmitysjärjestelmän teoria.....	7
4.1 Maalämpöpumppu.....	7
4.1.1 Maalämpö	7
4.1.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate	8
4.1.3 Maalämpöpumpun hyötysuhde ja mitoitus	11
4.1.4 Maalämpöjärjestelmän kustannukset	12
4.2 Lämpökaivot	13
4.2.1 Lämpökaivoja koskeva lainsäädäntö ja määräykset.....	13
4.2.2 Lämpökaivojen rakenne.....	14
4.2.3 Lämpökaivojen suunnittelu	16
4.3 Poistoilma	17
4.3.1 Ilmanvaihdon perusteet.....	17
4.3.2 Poistoilmalämmön talteenotto.....	19
5 Järjestelmäkuvaus	22
6 Laskut.....	25
6.1 Poistoilmaenergian määrä ja sen hyödyntäminen	25
6.2 Lämpökaivomitoitus.....	26
6.3 Kustannusvertailu eri järjestelmien välillä	28
7 Tulokset	32
8 Johtopäätökset ja pohdinta.....	34
Lähteet.....	36
Liitteet	39

Liite 1: Kostean ilman Mollier-diagrammi (Mollier Diagram n.d).	39
Liite 2: Lämpökaivosuunnitelma	40
Liite 3: Järjestelmän kytkentäkaavio	41

Kuviot

Kuvio 1. Lämpöpumpun toimintaperiaate (Petrecca 1992, 244).....	9
Kuvio 2. Lämpökaivon rakenne (Juvonen & Lapinlampi 2013, 35).	15
Kuvio 3. Ristivirtalevylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Installations n.d).	19
Kuvio 4. Pyöriväkennoinen lämmönsiirrin (Rotate heat exchanger n.d).	20
Kuvio 5. Maalämpökaivoryhmän ja kokoomakaivon asennus- ja kytkentäperiaate ...	23
Kuvio 6. Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailudiagrammi	32

Taulukot

Taulukko 1. Lämpökaivon suositeltavat minimietäisyydet eri kohteisiin (Juvonen & Lapinlampi 2013, 25).	16
Taulukko 2. Sähkön hintatiedot	29
Taulukko 3. Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailu 15 vuoden ajalta.....	31

1 Johdanto

1.1 Lähtökohdat

Energianhinnan nousu on viime vuosina saanut ihmiset kiinnostumaan yhä enemmän energiatehokkuusasioista. Rakennusten energiatehokkuutta on mahdollista parantaa monilla eri ratkaisuilla, joista yksi on poistoilmaenergian hyödyntäminen.

Poistoilmaenergian hyödyntäminen on noussut suosioon vasta 2000-luvulla, ja tästä syystä tekniikka ja lainsäädäntö ovat melko nuorta tällä saralla.

Varsinkin uudiskohteiden energiatehokkuuteen on kiinnitetty huomiota kunnolla vasta viimeisen vuosikymmenen aikana. Aikaisemmin energianhinta oli suhteellisen halpaa verrattuna nykyiseen, eikä energiankäytön vanhanaikaisiin tottumuksiin ollut tarvetta puuttua juuri lainkaan. Energiatehokkuuteen uudisrakennuksissa pyrittiin keskittymään rakentamisessa materiaalien ja tiiveyden avulla. Energianhintojen noustessa vanhempien rakennusten energiankäyttöön jouduttiin keskittymään enemmän, koska rakennusteknisiä muutoksia ei ollut mahdollista tehdä järkevin kustannuksin. Tämän johdosta esimerkiksi poistoilmaenergian hyödyntämistä tutkittiin ja kehitettiin saneerauskohteissa. Uudiskohteissa sama vanha kaava jatkui aina 2000-luvulle saakka, kunnes energianhinta alkoi kohota niin korkeaksi, että oli tarve keskittyä rakennusteknisten ratkaisujen lisäksi lämmitysjärjestelmien energiatehokkuuteen.

Työssä tutkittiin Järvenpään Verstaspihankadulle rakennettavan päiväkotin Pollen lämmitysjärjestelmää ja varsinkin poistoilmaenergian hyödyntämistä järjestelmässä. Työssä poistoilmalla tarkoitetaan sitä poistoilmaa, jota ei voi hyödyntää rakennuksen ilmanvaihdon tuloilman esilämmitykseen. Päiväkodin rakennuttamisesta vastaa Järvenpään kaupungin tytäryhtiö Mestaritoiminta Oy, joka on keskittynyt energiatehokkaaseen rakentamiseen. Kohteessa poistoilmaenergia siirretään

lämpöpumppujärjestelmän maapiiriin ja sitä kautta hyödynnetään lämmitysjärjestelmässä.

1.2 Tavoitteet, menetelmä ja rajaukset

Työn päällimmäinen tavoite oli selvittää, kuinka paljon poistoilmaenergian hyödyntämisellä voidaan vaikuttaa lämmitysjärjestelmän kustannuksiin uudiskohteessa, ja kuinka paljon poistoilmaenergiaa on hyödynnettävissä tämän kokoluokan kohteessa. Tavoitteena oli myös selvittää, millaisella kytkennällä hyödyntäminen lämpöpumppujärjestelmän maapiiriin on mahdollista, ja mitkä ovat kytkennän hyödyt ja haitat. Lisäksi työssä haettiin vastauksia seuraaviin kysymyksiin:

- Millä tavalla poistoilmaenergian hyödyntäminen vaikuttaa lämpökaivosuunnitteluun?
- Miksi lämmitysjärjestelmässä poistoilmaenergian siirtämiseen käytetään eri lämmönsiirtonestettä, kuin mikä maapiirissä kiertää?
- Mikä on kustannustehokkain lämmitysjärjestelmä tähän kohteeseen?

Tavoitteiden saavuttamiseksi menetelminä käytettiin laskuja ja kustannusvertailuja. Työssä laskettiin hyödynnettävissä olevan poistoilmaenergian määrä, sen siirtämisen hyötysuhde ja lopullinen energian määrä, joka saadaan hyödynnettyä järjestelmän keruupiiriin. Lämpökaivomitoituksessa laskettiin lämpökaivojen tehollinen syvyys ilman poistoilmaenergian hyödyntämistä sekä poistoilmaenergian hyödyntämisen kanssa. Lämpöpumppujärjestelmän ja kaukolämpöjärjestelmän välillä tehtiin kustannusvertailu 15 vuoden ajanjaksolla. Lisäksi työssä perusteltiin teorian ja käytännön kokemusten perusteella, miksi juuri kyseinen kytkentävaihtoehto on paras tähän kohteeseen.

Työn aihe rajattiin pelkästään lämmitysjärjestelmän tarkasteluun, poistoilmaenergian hyödyntämiseen järjestelmässä ja sen vaikutuksiin kustannuksissa sekä

lämpökaivomitoitukseen. Työssä ei oteta kantaa rakennuksen tehontarpeen laskentaan, eikä siihen vaikuttaviin rakennusteknisiin asioihin. Työssä ei myöskään salassapitosopimusten takia oteta kantaa lämmitysjärjestelmän todellisiin investointikustannuksiin, vaan pysyttäydään arvioissa.

2 Mestaritoiminta Oy

Mestaritoiminta Oy on vuonna 2007 perustettu yritys, joka toimii Järvenpäässä. Mestaritoiminta Oy kuuluu Mestariasunnot-konserniin, jonka emoyhteisönä toimii Järvenpään kaupunki. Mestariasunnot-konserniin kuuluu Mestaritoiminnan lisäksi Kiinteistö Oy Järvenpään Tilat.

Mestariasunnot-konserni omistaa Järvenpäässä 51 kiinteistöä, joissa on yhteensä 1685 asuntoa. Konsernin liikevaihto vuonna 2012 oli 13,44 miljoonaa euroa. Konsernin toimialana on rakentaa, rakennuttaa ja kunnossapitää Järvenpään kaupunkiin rakennettuja ja rakennettavia kerros- ja pientaloja, niiden tontteja ja niissä olevia asuntoja.

Mestaritoiminta Oy:n palveluihin kuuluvat talonmies-, siivous-, kunnossapito-, rakentamis- ja rakennuttamispalvelut. Palveluiden avulla Mestaritoiminta Oy huolehtii Järvenpään kaupungin vuokra-asunnoista sekä vastaa uusien kaupungin kiinteistöjen rakentamisesta. Rakentaminen Mestaritoiminta Oy:ssä hoidetaan pääasiassa projektinjohtomallilla, jolloin rakennusurakoissa on mahdollista saada aikaiseksi merkittäviä säästöjä sekä rahallisesti että ajallisesti. Yrityksen toimitusjohtaja on Veikko Simunaniemi ja yrityksessä on kolmisenkymmentä työntekijää. (Järvenpään Mestariasunnot Oy n.d.)

Mestaritoiminta Oy keskittyy uudisrakennuksissa erityisesti energiatehokkaaseen rakentamiseen. Järvenpäähän rakennettava Mestaritorppa valittiin Suomen ilmastoystävällisin kerrostalo –kilpailun jaetulle ykkössijalle vuonna 2013. Kilpailussa

arviointiperusteena käytettiin koko rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä, joka ottaa huomioon myös materiaali- ja energiavirrat. Lisäksi Järvenpään on rakennettu Suomen ensimmäinen nollaenergiakerrostalo, joka valmistui vuonna 2011. (Nämä ovat Suomen ilmastoystävällisimmät kerrostalot 2013.)

3 Päiväkoti Polle

Päiväkoti Polle on Järvenpään rakennettava uusi päiväkoti, jonka on tarkoitus valmistua helmikuussa 2015. Päiväkodissa on tilat noin 200 henkilölle, joista 135 on päiväkodin lapsille, osa henkilökunnalle ja lisäksi tiloissa tulee toimimaan perhekeskus. Päiväkoti tulee sijaitsemaan Verstaspihankadulla Järvenpään Lepolassa. Pinta-alaltaan päiväkoti on 2160 m². (Ajankohtaista n.d.)

Päiväkotirakennuksen laskettu huipputehontarve on 181 kW. Tehontarve koostuu lattialämmityksen tehontarpeesta, ilmanvaihtopatterien tehontarpeesta ja käyttöveden tehontarpeesta. Lattialämmityksen mitoitusteho on 47 kW, iv-patterin mitoitusteho 100 kW, käyttöveden tehontarve 34 kW. Kohteen vuosittainen laskettu energiantarve on noin 366 MWh.

Kohde rakennetaan matalaenergiaratkaisulla, joka tarkoittaa, että rakennuksen laskennallisten lämpöhäviöiden tulisi olla enintään 85 % määritetyistä vertailulämpöhäviöistä. Kohteessa pyritään keskittymään energiatehokkaisiin ratkaisuihin jo rakennusaikana (Matalaenergiatalon määritelmä 2013). Energiatehokkuutta kohteessa edistetään myös lämmitysjärjestelmällä. Lämmitysjärjestelmä tullaan rakentamaan maalämpöjärjestelmänä, jonka tarkoituksena on pienentää energiakustannuksia verrattuna muihin järjestelmiin. Lämpöenergia kerätään lämpökaivojen avulla maaperästä. Lisäksi lämmitysjärjestelmässä hyödynnetään poistoilmaenergiaa, jota ei voi ilmanvaihdossa käyttää hyödyksi tuloilman esilämmitykseen.

4 Lämmitysjärjestelmän teoria

4.1 Maalämpöpumppu

4.1.1 Maalämpö

Maalämmöllä tarkoitetaan maaperään tai veteen varastoitunutta lämpöenergiaa. Energia syntyy joko auringon säteilyenergian tuottamana tai maan sisuksissa tapahtuvien radioaktiivisten hajoamisten tuottamana geotermisenä energiana. Maalämpöpumppu kerää varastoitunutta energiaa keruuputkistojen avulla.

Suomessa eniten käytetty maalämpöpumpun lämmönlähde on lämpökaivo. Yli 60 % Suomen maalämpöjärjestelmistä saa energiansa lämpökaivon avulla. Vaikka lämpökaivo on melko kallis investointi, on se usein ainoa vaihtoehto ahtaiden tonttien vuoksi.

Lämmönkeruupiiri on mahdollista asentaa myös vaakaputkistona. Noin 30 % Suomen maalämpökohteista on toteutettu vaakaputkiston avulla. Putkiston asennussyvyyteen vaikuttaa maantieteellinen sijainti, mutta Suomessa putkistot asennetaan yleensä noin metrin syvyyteen. Maaperä vaikuttaa putkistojen pituuteen: savipohjaisesta maasta saadaan energiaa parhaiten, kun taas hiekkapohjaisessa maaperässä putkiston pituus voi olla 30–40 % pidempi kuin savipohjaisessa.

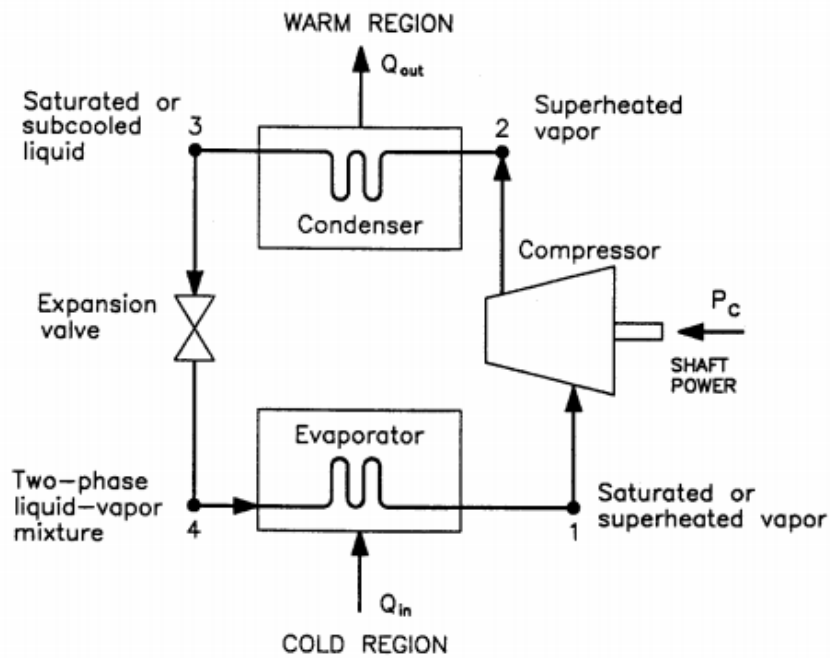
Keruupiiri on mahdollista asentaa myös vesistöön. Keruupiiri ankkuroidaan vesistön pohjaan vähintään 2 metrin syvyyteen. Painoja asetetaan noin 3-5 metrin välein, joiden avulla putkisto saadaan pysymään pohjassa. Vesistöstä on mahdollista saada suurempia energiamääriä kuin maaperään asennettavista keruuputkistoista veden hyvän lämmönsiirtokapasiteetin vuoksi. Kuitenkin tämä lämmönkeruutapa ei ole

kovin suosittu varsinkaan pientalokohteissa. Lupaprosessit vesistöjen käyttämiseen energianlähteenä voivat olla pitkiä ja vaikeita, ja keruuputkistojen asennuskustannukset nousevat arvioitua suuremmiksi painojen ja mahdollisten lisäpumppujen takia. (Maalämpöpumppu 2013.)

4.1.2 Maalämpöpumpun toimintaperiaate

Maalämpöpumppuun kuuluu neljä peruskomponenttia: Lauhdutin, höyrystin, kompressori ja paisuntaventtiili. Näiden neljän komponentin välillä kiertää kylmäaine, joka siirtää energiaa lämmönlähteestä lämmitysjärjestelmään. Toimintaperiaate perustuu Carnot'n kiertoprosessiin, jolla voidaan määrittää lämpövoimaproessin hyötysuhteen yläraja.

Keruupiirin neste, joka sisältää yleensä noin 30 % etanolia jäätymisen ehkäisemiseksi, kerää lämpöenergiaa lämmönlähteestä. Neste palaa takaisin höyrystimelle muutaman asteen lämmenneenä, jolloin lämpöenergia siirtyy kylmemmässä tilassa olevaan kylmäaineeseen. Kuviossa 1 on esitetty lämpöpumpun kiertoprosessi, jossa näkyy myös kylmäainekierron entapiapisteet, joiden avulla kiertoprosessin energiat ja tehot ovat laskettavissa.



Kuvio 1. Lämpöpumpun toimintaperiaate (Petrecca 1992, 244).

Höyrystimelle tulevan energian määrä (Q_{in}) lasketaan pisteiden 4 ja 1 entalpioiden erotuksen avulla. Pisteessä 4 kylmäaine on nesteen ja höyryn seosta ennen siirtymistä höyrystimelle. Höyrystimessä kylmäaine absorboi itseensä lämpöä lämmönlähteestä ja muuttuu samalla kylläiseksi höyryksi. Saatavan energian määrä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\frac{Q_{in}}{m} = h_1 - h_4 \quad (1)$$

jossa

Q_{in} = lämmönlähteestä saatava teho (W)

m = kylmäainekierron massavirta (kg/s)

h_1, h_4 = pisteiden entalpia (J/kg)

Kompressorin ottama sähköteho on laskettavissa niin ikään entalpioiden erotuksen avulla. Pisteen 1 kylläinen höyry puristetaan kompressorissa suurempaan paineeseen, jolloin kylmäaineen lämpötila myös kasvaa. Pisteessä 2 kylmäaine on tulistettua höyryä ja sen energiasisältö on suurimmillaan koko kiertoon nähden. Kompressorin tarvitsevan sähkötehon määrä lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\frac{P_c}{m} = h_2 - h_1 \quad (2)$$

jossa

P_c = kompressorin tarvitseva sähköteho (W)

m = kylmäainekierron massavirta (kg/s)

h_1, h_2 = pisteiden entalpia (J/kg)

Samalla periaatteella voidaan laskea loppukierron energiamäärät. Lauhduttimessa tulistettu höyry luovuttaa lämpöenergiaa lämmitysjärjestelmään muuttaen tilaansa samalla kylläiseksi nesteeksi. Piste 2 entalpia vähennetään piste 3 entalpiasta, jolloin saadaan laskettua lämmitysjärjestelmään luovutetun tehon määrä:

$$\frac{Q_{out}}{m} = h_2 - h_3 \quad (3)$$

jossa

Q_{out} = luovutettu lämpöteho (W)

m = kylmäainekierron massavirta (kg/s)

h_2, h_3 = pisteiden entalpia (J/kg)

Pisteiden 3 ja 4 välillä kylmäaine muuttaa faasiaan kylläisestä nesteestä nesteen ja höyryn seokseksi. Paisuntaventtiilissä aineen lämpötila ja paine alenee, mutta entalpia pysyy samana. Tämä johtuu siitä, että aineen faasimuutos nesteestä

höyryseokseksi tapahtuu laskemalla nesteen lämpötilaa. Pisteessä 4 kylmäaine on samassa tilassa kuin alussakin ja kierto alkaa alusta.

Laskettaessa kierto-prosessin arvoja, tulee ottaa huomioon prosessissa tapahtuvat häviöt. Carnot'n kierto perustuu kierto-prosessiin, jossa ei tapahdu minkäänlaisia häviöitä. Tämä ei tietenkään ole todellisuudessa mahdollista. Esimerkiksi kompressorissa tapahtuva paineennosto ei ole häviötöntä, vaan painehäviöitä syntyy jonkin verran. Myöskään lauhdutin ja höyrystin eivät ole täydellisesti toimivia, vaan molemmilla toimivat tietyllä hyötysuhteella. (Petrecca 1992, 243–248.)

4.1.3 Maalämpöpumpun hyötysuhde ja mitoitus

Lämpöpumppujen hyötysuhteen laskeminen perustuu COP-arvon (Coefficient of performance) määrittämiseen. Määrittäminen tapahtuu vertaamalla lämmönlähteestä saatua energianmäärää kompressorin käyttämään sähköenergian määrään. Kun on tiedossa kaaviolla 1 ja 2 saadut tehot, voidaan laskea järjestelmän COP-arvo seuraavalla kaavalla (Petrecca 1992, 249.):

$$COP = \frac{(Q_{in}/m)}{(P_c/m)} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (4)$$

Esimerkiksi, jos lämpöpumppu ottaa keruupiiristä 3 kW tehoa, johon kompressori tarvitsee 1 kW:n sähkötehon, on lämpöpumpun COP-arvo 3. Tämä tarkoittaa, että lämpöpumppu saa niin sanottua ilmaista energiaa keruupiiristä 2 kW:n edestä. Mitä suurempi COP-arvo on, sitä energiatehokkaampi lämpöpumppu on. Omakotitalon kokoisissa kohteissa COP on usein noin 3 luokkaa riippuen olosuhteista ja lämpöpumpusta. Suuremmissa kohteissa on mahdollista päästä parempiin arvoihin. Lämpöpumppujen valmistajat ilmoittavat usein lämpöpumppujensa parhaan mahdollisen COP-arvon, joka on mahdollista saavuttaa parhaissa mahdollisissa

olosuhteissa hetkellisesti. Tämän takia on käytteenotettu SCOP-arvo, joka kertoo COP-arvon koko lämmityskauden ajalta.

Lämpöpumppujärjestelmä voidaan mitoittaa täystehon tai osatehon mukaan. Täystehomitoituksessa järjestelmä mitoitetaan kohteen huipputehontarpeen mukaan, jolloin järjestelmässä ei tarvitse käyttää apuna erillisiä energianlähteitä. Osatehomitoituksella järjestelmä mitoitetaan kattamaan 50–80 % huipputehontarpeesta, jolloin energianpeitto on 60–98 % luokkaa. Tällä tavoin lämpöpumpun käyntiaika saadaan pidemmäksi ja energiatehokkuus paranee. Täystehomitoituksella lämpöpumpun käynti on hetkittäistä, joka vaatii enemmän sähkötehoa kuin tasainen käynti. Toisaalta osatehomitoituksella tarvitaan järjestelmään huipputehontarpeen ajaksi jokin muu energianlähde. Usein lämpöpumppujärjestelmissä huipputehontarve hoidetaan sähkövastusten avulla. (Eskola, Jokisalo & Sirén 2012, 8.)

4.1.4 Maalämpöjärjestelmän kustannukset

Maalämpöpumppujen hinnasta on hankala kertoa mitään nyrkkisääntöä, koska valmistajia ja malleja markkinoilla on pilvin pimein. Muutenkin maalämpöpumppu on yksi osa koko järjestelmää, eikä sen avulla pysty hinnoittelemaan koko lämmitysjärjestelmää. Hintaan vaikuttavat myös asennuskustannukset ja lämmönkeruujärjestelmä. Jos haluaa hieman etukäteen miettiä lämmitysjärjestelmän kokonaiskustannuksia, voi arvioida, että hinta on karkeasti 1700–2500 €/lämpöpumppukilowatti. Tämä on kuitenkin vain suuntaa antava haarukka.

Koska lämpöpumppujärjestelmän hinnoittelu on hankalaa, kannattaa sitä lähteä tarkastelemaan säästöjen ja takaisinmaksuaikojen perusteella. Vertailemalla erilaisiin energialähteisiin, kuten sähköön, kaukolämpöön ja öljyyn, voidaan pelkästään energiahintojen perusteella saada osviittaa lämpöpumppujärjestelmän kannattavuudesta. Lämpöpumppujärjestelmällä pitäisi päästä tilanteessa kuin

tilanteessa 3 SCOP-arvoon, joten sitä voi käyttää melko luotettavasti lähtökohtana laskennassa. Laskennassa tulee huomioida myös energianhinnan nousu, joka nousee vuosittain noin 3-4 %. (Hirvonen 2014.)

4.2 Lämpökaivot

4.2.1 Lämpökaivoja koskeva lainsäädäntö ja määräykset

Ennen maalämpöjärjestelmän rakentamista tulee rakentajan tai rakennuttajan olla tietoinen lämpökaivoja koskevista lainsäädännöistä ja määräyksistä. Normaalisti rakentamiseen riittävät maankäyttö- ja rakennuslain mukainen toimenpidelupa ja vesilain mukainen lupa. Kunta voi kuitenkin määrätä erilaisia maankäyttö- ja rakennuslain mukaisia lupaehtoja kunnan eri alueille. Kunnalla on mahdollisuus ohjata järjestelmän rakentamista olosuhteiden vaatimusten mukaan rakennusjärjestyksen tai asemakaavan avulla.

Muita lainsäädäntöjä, joita maalämpöjärjestelmää rakennettaessa tulee ottaa huomioon, on useita: Ympäristönsuojelulaki (86/2000), kiinteistönmuodostamislaki (554/1995), kemikaalilaki (744/1989) ja terveydensuojelulaki (763/1994).

Rakennushankkeesta vastaava voi sopia urakoitsijan kanssa rakennushankkeen tarkastamisesta ja laadunvalvonnasta, mutta loppupelissä rakennushankkeesta vastaava on vastuussa rakenteiden ja materiaalien oikeellisuudesta. Tällä hetkellä lämpökaivojen rakentajilta ei vaadita pätevyyttä Suomessa, joten hankkeesta vastaavan tulee olla tarkkana asioista.

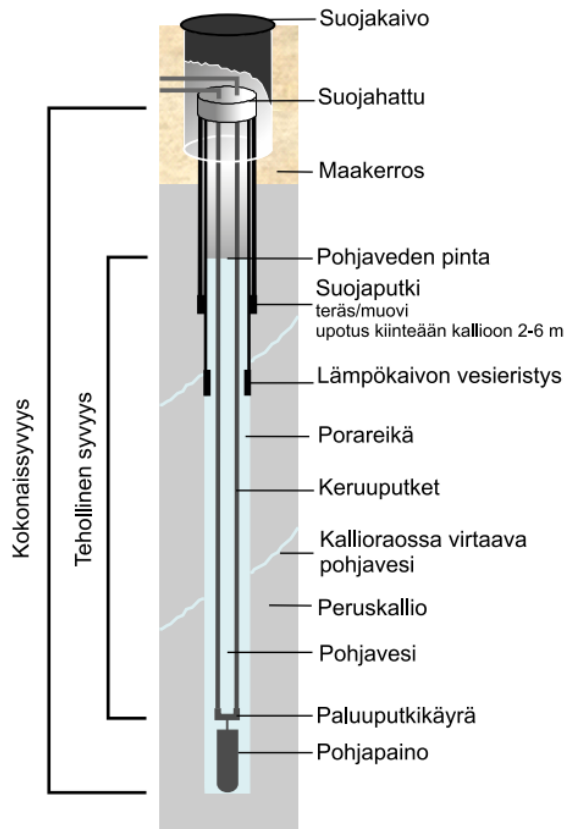
Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on määritelty määräyksiä ja ohjeita rakennusten energiatehokkuudesta ja kiinteistöjen vesilaitteistoista. Määräykset velvoittavat mitoittamaan lämmitysjärjestelmän lämmitystehon siten, että lämmintä käyttövettä on käytettävissä riittävästi ja siten, että lämminvesilaitteistossa olevan

veden lämpötila on vähintään 55 °C. Lisäksi lämmönkehityslaitteisto on suunniteltava ja toteutettava niin, että se toimii hyvällä hyötysuhteella sekä huippu- että osakuormilla. Rakentamismääräyksessä on myös kohta, jossa lämmitysjärjestelmän teho veloitetaan mitoittamaan niin, että lämpöolot voidaan ylläpitää lämmityskauden mitoittavilla ulkolämpötiloilla eri säävyöhykkeillä. Nämä määräykset tulee ottaa huomioon maalämpöjärjestelmää ja lämpökaivoja suunniteltaessa. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 13–21.)

4.2.2 Lämpökaivojen rakenne

Lämpökaivon syvyys määritetään rakennuksen energiantarpeen mukaan. Yleensä pientalokohteissa riittää yksi porareikä, mutta suurempaa tehoa tarvittaessa voidaan tehdä useampia porareikiä. Lämpökaivojen syvyys on maksimissaan noin 300 metriä, mutta usein lämpökaivojen syvyys pysyttelee 100–200 metrin välillä. Porareikien halkaisija Suomessa vaihtelee 105–165 mm:n välillä. Lämpökaivon yläosaan asennetaan suojaletku, joka estää pehmeän maan sortumisen lämpökaivoon. Suojaletkun pituus riippuu maaperäkerroksen syvyydestä ja lisäksi suojaletku upotetaan muutaman metrin osuudelta kallioon.

Lämmönkeruuputkisto asennetaan porareikään pohjapainojen avulla. Muoviputki ja lämmönkeruuneste ovat kevyempiä kuin vesi, jolloin putkisto ei pysy porareikän pohjalla ilman painoja. Kaivon päälle asetetaan suojaletku, joka suojaa sadeveden ja irtomaan pääsemisen porareikään. Kaivon päällä on mahdollista käyttää myös paineen kestävää suojaletkua, jos reiästä purkautuu paineellista vettä. Kuviossa 2 on esitetty lämpökaivon rakenne.



Kuvio 2. Lämpökaivon rakenne (Juvonen & Lapinlampi 2013, 35).

Tavallisesti porareikä porataan suoraan alaspäin, mutta ahtaissa paikoissa on mahdollista käyttää vinoreikiä silloin, kun reikiä porataan lähemmäs kuin 15 metriä toisistaan. Vinoreikien lähtöpisteet tulee olla yli 5 metrin päässä toisistaan ja vierekkäisten reikien välinen kulma on 5-30 asteen välillä. Lähekkäin olevien reikien kanssa tulee muistaa turvallisuusasiat entistä tarkemmin. Lähelle toista reikää porattaessa on mahdollista, että porauspaine purkautuu ulos toisesta reiästä aiheuttaen vaaratilanteen lähellä oleville henkilöille. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 33–35.)

4.2.3 Lämpökaivojen suunnittelu

Lämpökaivon suunnittelusta vastaa maalämpöjärjestelmän suunnittelija. Suunnittelijalla tulee olla pätevyys järjestelmän suunnitteluun, jonka voi saada Suomen lämpöpumppuyhdistyksen (Sulpu ry) järjestämästä lämpöpumppualan sertifiointikoulutuksesta. Lämpökaivon osalta suunnittelija vastaa kaivon mitoittamisesta sekä lämpökaivon ja siirtoputkien sijoittamisesta tontille. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 20.)

Lämpökaivojen paikan valintaan vaikuttavat lähellä olevat muut lämpökaivot, talousvesikaivot, rakennukset ja kiinteistön raja. Taulukossa 2 on lueteltu suositusetäisyyksiä eri kohteisiin, jotka ovat kuitenkin vain suosituksia ja tarpeen mukaan sovellettavissa kohteeseen sopivaksi. Suositustaulukko antaa osviittaa etäisyyksistä, joilla on mahdollista välttää suurimmat ongelmakohtat, kuten esimerkiksi lämpökaivojen tehon riittämättömyyden, jos kaivot ovat liian lähellä toisiaan. Erityisesti pientalokohteissa etäisyyksien kanssa joutuu tekemään kompromisseja tonttien ahtauden takia. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 24–26.)

Taulukko 1. Lämpökaivon suositeltavat minimietäisyydet eri kohteisiin (Juvonen & Lapinlampi 2013, 25).

Kohde	Suositteltu minimietäisyys
Energiakaivo	15 m*
Lämpöputket ja kaukolämpöjohdot	3 m**
Kallioporakaivo	40 m
Rengaskaivo	20 m
Rakennus	3 m
Kiinteistön raja	7,5 m*
Kiinteistökohtaisen jätevedenpuhdistamon purkupaikka	Kaikki jätevedet 30 m, Harmaat vedet 20 m ^[14]
Viemärit ja vesijohdot	3 m (omat putket)-5 m (muiden putket)**
Tunnelit ja luolat	25 m, etäisyys selvitetään tapauskohtaisesti

* porareian ollessa pystysuora

** etäisyys riippuu maaperän laadusta, kaivusyvyvyydestä ja kaivantoon sijoitettavista putkista

Rakennuksen energiantarve on lämpökaivomitoituksen perusta. Sen pohjalta määritetään lämpökaivon tehollinen syvyys, joka vaikuttaa lämpökaivon kokonaissyvyyteen. Rakennuksen tehontarpeeseen vaikuttavat monet tekijät: rakennuksen eristystaso, muut lämmönlähteet, käyttöveden tarve, ilmanvaihto ja maantieteellinen sijainti (Juvonen & Lapinlampi 2013, 30–32). Kun käyttöveden tehontarve on 20 % tai alle kokonaistehontarpeesta, sitä ei huomioida lämpöpumppujärjestelmän mitoituksessa. Käyttövesi massataan käyttövesivaraajilla, jolloin tarvittava käyttövesimäärä saadaan taattua ilman, että se otetaan huomioon mitoituksessa. (Hirvonen 2014.)

Lämpökaivosta saatavan energian määrä riippuu rakennushankkeen maantieteellisestä sijainnista. Karkeasti voidaan sanoa, että Suomessa lämpökaivon aktiivisyvyydeltä saadaan tehoa irti 30–50 W/m. Maalämpöjärjestelmän suunnittelija pystyy geologian asiantuntijoiden avustuksella määrittämään tarkasti maaperästä saatavan tehon kuhunkin rakennuskohteeseen. Kun suunnittelijalla on tiedossa rakennuksen tehontarve ja lämpökaivosta saatava teho, pystyy hän mitoittamaan kaivon tai kaivojen syvyyden, ja tätä kautta myös muun järjestelmän tehon. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 30–32.)

4.3 Poistoilma

4.3.1 Ilmanvaihdon perusteet

Suomen rakentamismääräyksen osassa D2 annetaan ohjeet ja määräykset rakennusten sisäilmasta ja ilmanvaihdosta. Suomessa uudisrakennusten ilmanvaihdon suunnittelu ja toteutus tehdään tähän määräykseen perustuen. Ilmanvaihdon suunnittelussa pohjana käytetään ilmanvaihtokerrointa ja määräyksissä eri tiloille annettujen ulkoilmavirtojen ohjearvoa. Normaalisti asuntojen ilmanvaihtokertoimenä käytetään vähintään 0,5 1/h, joka tarkoittaa, että

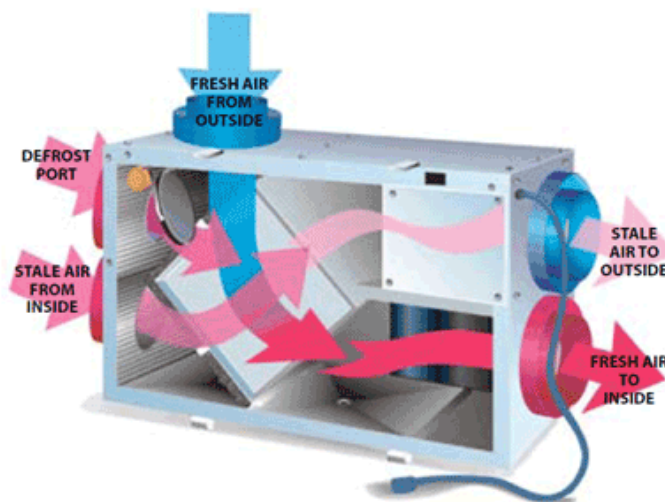
rakennuksen ilmassa on vaihdettava kerran kahdessa tunnissa. Pienissä asunnoissa ohjearvot ovat 0,7-1,0 1/h välillä. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2012, 25.)

Ilmanvaihdon toiminta perustuu paine-eroihin, jossa ilma siirtyy suuremmasta paineesta pienempään. Ilmanvaihto voidaan toteuttaa joko koneellisena poistoilmanvaihtona, koneellisena tulo- ja poistoilmanvaihtona tai painovoimaisena ilmanvaihtona. Koneellisessa ilmanvaihdossa paine-ero saadaan aikaiseksi puhaltimien avulla. Poistoilma puhalletaan kosteista tiloista ja keittiöstä keskitetysti huippuimurin avulla ulkoilmaan. Tuloilma otetaan koneellisessa ilmanvaihdossa raitisilmaventtiilien kautta, jotka voivat aiheuttaa väärin sijoitettuna vedon tunnetta, sekä huonosti huollettuna päästää pienhiukkasia sisäilmaan. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa sekä tulo- että poistoilma puhalletaan koneellisesti, joka edistää varsinkin tuloilman suodattamisen tehokkuutta. Samalla tuloilmaa on mahdollista lämmittää etukäteen tarpeen vaatiessa. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa paine-ero syntyy tuulen ja lämpötilaerojen avulla. (Energiatehokas ilmanvaihto 2012.)

Ilmanvaihdon tehtävänä on edesauttaa ihmisten terveyttä poistamalla huoneilmassa syntyvät epäpuhtaudet ja tuomalla puhdasta hengitysilmaa sisätiloihin. Huono ilmanvaihto vaikuttaa epäpuhtauksien syntymiseen, jotka voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa sairauksia ihmisille. Pientalouksissa ilmanvaihtoa suositellaan pitämään päällä jatkuvasti, ja jos taloudellisista syistä toimistorakennuksissa ilmanvaihto suljetaan yöksi, suositellaan se laittamaan päälle vähintään kahta tuntia ennen työntekijöiden saapumista puhtaan ilman varmistamiseksi. Koneellisella ilmanvaihdolla pystytään varmistumaan puhtaammasta ilmasta kuin painovoimaisella ilmanvaihdolla, koska koneellisessa tuloilma suodatetaan tarkemmin. (Ilmanvaihdon perusteet n.d.)

4.3.2 Poistoilmalämmön talteenotto

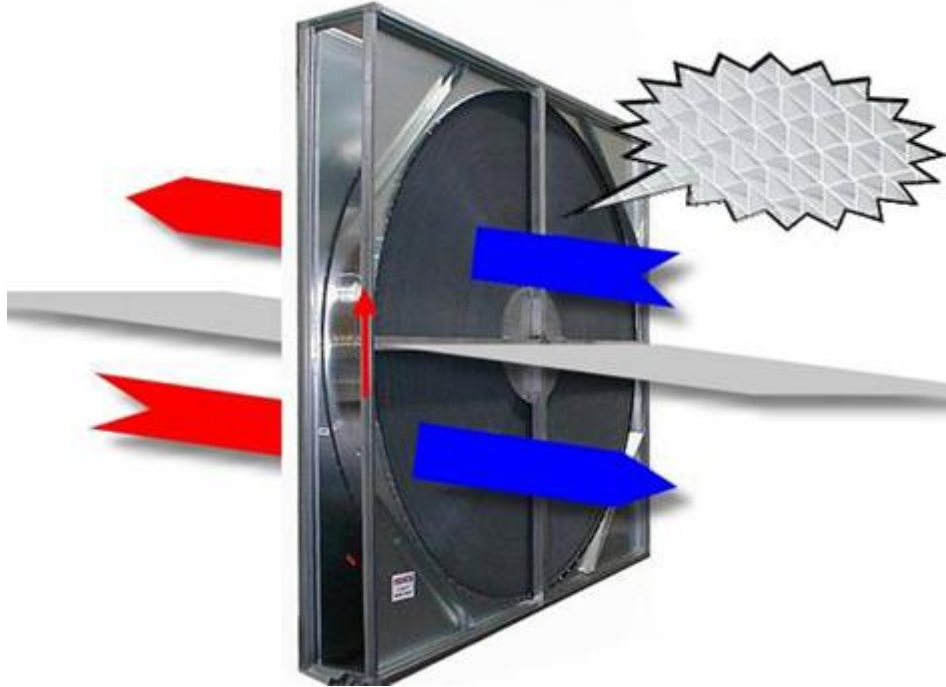
Nykyisin lähes kaikissa uudisrakennuksissa käytetään koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtoa, johon on lisätty lämmön talteenotto tehostamaan rakennuksen energiatehokkuutta. Ilmanvaihtokoneen lämmön talteenotto voidaan toteuttaa ristivirtalevylämmönsiirtimellä, vastavirtalevylämmönsiirtimellä tai pyöriväkennoisella lämmönsiirtimellä. Ristivirtalevylämmönsiirtimessä tuloilma ja poistoilma kulkevat lämmönsiirtimessä ristiin nimensä mukaisesti niin, että joka toisessa levyälissä virtaa tuloilma ja joka toisessa poistoilma, jolloin lämpimästä poistoilmasta siirtyy lämpöenergiaa viileämpään tuloilmaan. Vastavirtalevylämmönsiirtimessä kennoston pinta-ala on hieman suurempi ja ilmavirrat virtaavat osan matkasta vastakkain, millä hyötysuhdetta saadaan parannettua. (Yleisiä termejä ilmanvaihdossa n.d.)



Kuvio 3. Ristivirtalevylämmönsiirtimen toimintaperiaate (Installations n.d).

Pyöriväkennoisessa lämmönsiirtimessä eli regeneratiivisessa lämmönsiirtimessä poistoilma varaa lämpöä kennon metalliosiin. Pyöreä kennosto on jaettu kahteen osaan, jossa toisella puolella virtaa lämmin poistoilma ja toisella viileä tuloilma. Pyöriessään poistoilman puolella lämpöä varanneet metalliosat siirtyvät tuloilman

puolelle luovuttaen lämpöä tuloilmaan. Kuviossa 4 on esimerkki pyöriväkennoisen lämmönsiirtimen toiminnasta. (Yleisiä termejä ilmanvaihdossa n.d.)



Kuvio 4. Pyöriväkennoinen lämmönsiirrin (Rotate heat exchanger n.d).

Ristivirtalevylämmönsiirtimen hyötysuhde näistä kolmesta on huonoin, noin 50–60 %. Vastavirtalevylämmönsiirtimen tekniikalla on mahdollista päästä noin 70–80 % vuosihyötysuhteeseen. Paras hyötysuhde on pyöriväkennoisella lämmönsiirtimellä, jolla vuosihyötysuhde on normaalisti yli 80 %. (Yleisiä termejä ilmanvaihdossa n.d.)

Pyöriväkennoisen ongelmaksi voi muodostua kuitenkin ilmavirtojen sekoittuminen, jolloin epäpuhdas poistoilma sekoittuu tuloilmaan. Suomen rakentamismääräyksen osassa D2 on määräyksiä, millaista poistoilmaa pyöriväkennoisissa lämmönsiirtimissä voi käyttää. Määräyksessä sanotaan seuraavaa: *”Sellaisia lämmöntalteenottolaitteita, joissa tulo- ja poistoilma virtaavat vuorotellen samassa virtausreitissä (regeneratiivinen lämmönsiirrin) voidaan käyttää vain, jos poistoilmassa on korkeintaan 5 % luokan 3 poistoilmaa, eikä lainkaan luokan 4*

poistoilmaa. Yhden perheen asunnossa voidaan kuitenkin käyttää regeneratiivista lämmönsiirrintä lämmöntalteenoton luokan 3 ilmasta.” Luokan 3 poistoilmalla tarkoitetaan WC- ja pesutilojen, saunojen, asuinhuoneistojen keittiöiden, jakelu- ja opetuskeittiöiden ja piirustuksien kopiointitilojen poistoilmoja. Omakotitalouksissa tämä määräys ei aiheuta toimenpiteitä, mutta suuremmissa rakennuksissa määräys aiheuttaa päänvaivaa, koska iso osa poistoilmaenergiasta on saatavissa juuri kosteista tiloista sekä keittiöstä. (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2012, 12–17.)

Rakennuksen ilmanvaihtokoneisto on mahdollista korvata poistoilmalämpöpumpulla (PILP). Poistoilmalämpöpumpun toimintaperiaate on samantapainen kuin maalämpöpumpussakin, energianlähteenä toimii vain poistoilma. PILP:n avulla on mahdollista tehdä erilaisia sovelluksia lämmitysjärjestelmään. Kun koneellisella ilmanvaihdon lämmön talteenottojärjestelmällä poistoilmaenergia on hyödynnettävissä pelkästään tuloilmaan, pystytään poistoilmalämpöpumpulla siirtämään lämpöenergiaa tuloilman lisäksi käyttöveden lämmitykseen, lämmitysjärjestelmään, tai vaikka lämpöpumppujärjestelmän keruuputkistoon.

Pientalokohteissa poistoilmalämpöpumppua voidaan käyttää talon ainoana lämmitysjärjestelmänä, joskin suurimman energiatarpeen aikana joudutaan turvautumaan sähkövastusten apuun. PILP sopii varsin hyvin kohteisiin, joissa on käytetty matalaenergia- tai passiivirakentamista. Poistoilmalämpöpumpulla on mahdollista saavuttaa 40 % vuosittaiset ostettavan sähköenergian säästöt verrattuna sähkölämmitteiseen rakennukseen pientalokohteissa. (Poistoilmalämpöpumppu 2013.)

Poistoilmanenergian talteenotossa ilmamäärän teho kilowatteina saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$P = q * \Delta h * \rho \quad (5)$$

jossa

ρ = ilman tiheys (1,2 kg/m³, kun lämpötila +20 °C ja kosteus 40 %)

Δh = ilman entalpiaerotus (kJ/kg)

q = ilmamäärä (m³/s)

Ilmamäärän tehon määrittämiseen täytyy tietää poistoilman lämpötila ennen talteenottoa ja sen jäähdyttämisen jälkeen. Lisäksi tiedossa tarvitsee olla tiedossa ilman suhteellinen kosteus ja massavirta. Lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden avulla selvitetään ilman entalpiat eri lämpötiloissa Mollier-diagrammin avulla, joka löytyy liitteestä 1.

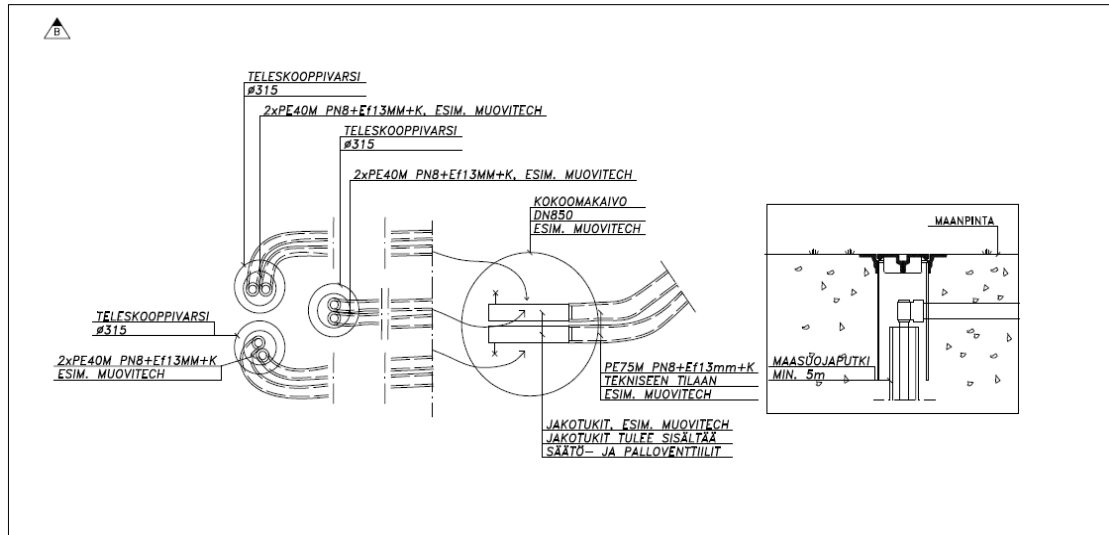
5 Järjestelmäkuvaus

Kohteen lämmitysenergia saadaan pääasiassa lämpökaivoista. Lämpökaivoja tulee tontille yhteensä 12, joiden avulla tarvittava energiateho saadaan kerättyä. Liitteessä 2 on kuva kohteen lämpökaivosuunnitelmasta, johon on piirretty tarvittavien kaivoryhmien, kokoomakaivojen ja putkistojen paikat.

Lämpökaivot on jaettu neljään kolmen kaivon ryhmään. Jokaisessa ryhmässä 3 kaivoa porataan vierekkäin niin, että keskimäinen kaivo on suora porakaivo ja vierellä olevat kaivot ovat 15° kulmassa olevia vinoreikiä. Tällä tavalla on helpompi kerätä lämpökaivojen keruupiirien putket yhteen, kuin niin, että kaivot olisivat sijoiteltu ympäri tonttia. Lisäksi vinoreikien avulla pystytään käyttämään tontilla oleva teho paremmin hyödyksi.

Lämpökaivojen keruupiirien putkistot kerätään yhteen kahdessa kokoomakaivossa. Molempien kokoomakaivojen jakotukkeihin tulee kuuden lämpökaivon keruuputkistot. Jakotukeilta lämmönkeruuneste siirretään lämmönjakohuoneeseen

lämpöpumpuille. Kuviossa 5 on kuvaus maalämpökaivoryhmän ja kokoomakaivon asennus- ja kytkentäperiaatteesta.



Kuvio 5. Maalämpökaivoryhmän ja kokoomakaivon asennus- ja kytkentäperiaate

Kohteen lämmitys hoidetaan kahden maalämpöpumpun avulla. Lämpöpumppujen avulla tehdään käyttöveden, lattialämmityksen ja ilmanvaihdon tarvitsemat lämpötehot. Vara- ja huipputehojärjestelmänä toimii 50 kW:n sähkökattila. Liitteessä 3 on esitetty osa järjestelmän kytkentäkaaviosta, jossa näkyy lämpöpumput, sähkökattila, keruupiiri, poistoilmaenergian talteenottojärjestelmä ja viilennyksen järjestelmä.

Lämmitysjärjestelmässä keruupiiriin hyödynnettävä poistoilmaenergia kerätään keittiön poistoilmasta, jota ilmanvaihdon lämmön talteenotossa ei voi käyttää säädöksien mukaan. Kohteen ilmanvaihtojärjestelmässä lämmön talteenotossa käytetään pyöriväkennoisia lämmönsiirtimiä, joissa ei saa käyttää luokan 3 poistoilmaa, jota keittiön poistoilma on. Jos keittiön poistoilmaa ei hyödynnettäisi järjestelmässä, puhallettaisiin se suoraan ulkoilmaan ja suuri energiamäärä jäisi hyödyntämättä.

Kohteessa on lisäksi kaksi wc-tilaa, joiden poistoilmaa ei niin ikään voi suoraan käyttää ilmanvaihdon tuloilman esilämmitykseen. Näiden poistoilmojen massavirta olisi yhteensä 960 litraa sekunnissa, mutta rakennusteknisistä syistä näitä poistoilmoja ei voida hyödyntää lämmitysjärjestelmässä. Wc-tilat sijaitsevat niin kaukana lämmönjakohuoneesta ja erillään toisistaan, että ei ole kannattavaa rakentaa putkistoja tilojen välille.

Kytkentäkaaviossa (liite 3) näkyy keittiöpoisto PF02, jonka poistoilma hyödynnetään Pilpit-lämmöntalteenottojärjestelmällä. Pilpit-laitteisto toimii poistoilmalämpöpumpun tavoin, mutta se on suunniteltu suuremman kokoluokan kohteisiin ja suurempiin poistoilmavirtauksiin. Pääasiassa Pilpit-järjestelmää käytetään vanhoissa kerrostalosaneerauskohteissa, mutta se on täysin sovellettavissa myös suurempiin uudiskohteisiin. Tässä kohteessa Pilpit-laitteiston hinta asennettuna on noin 10 000 euroa. (Kerrostalon lämmöntalteenotto Pilpit-lämmöntalteenottojärjestelmällä n.d.)

Keittiön poistoilmamäärä on jatkuvasti 380 l/s, mutta käyttötilanteissa ilmamäärä kasvaa 1070 l/s. Näiden arvojen avulla selvitetään laskennallinen ilmamäärä. Käyttötilanteella tarkoitetaan niitä aikoja vuorokaudesta, jolloin keittiö on toiminnassa. Voidaan ajatella, että keittiötä käytetään 8 tuntia päivässä ja 5 päivää viikossa. Muina aikoina massavirta on 380 l/s. Näillä arvoilla saadaan laskettua keskimääräinen poistoilmamäärä:

$$q = \frac{(1070 \text{ l/s} * 8 \text{ h} + 380 \text{ l/s} * 16 \text{ h}) * 5 \text{ vrk} + (380 \text{ l/s} * 24 \text{ h} * 2 \text{ vrk})}{24 \text{ h} * 7 \text{ vrk}} = 544 \frac{\text{l}}{\text{s}} \quad (6)$$

Hyödyksi käytettävän poistoilman virtaus on keskimäärin 544 l/s. Mitoituksessa käytetään arvoa 0,5 m³/s, jolla varmistetaan tehon saatavuus.

Poistoilmasta Pilpit-laitteistolla saatava energia siirretään keruupiirin lämmönsiirtimelle, joka näkyy kytkentäkaaviossa LTO:na. Lämmönsiirrin toimii vastavirtaperiaatteella, jossa Pilpit:n puolella kiertää 30 % etyleeniglykoli ja toisella puolella maalämpöneste, joka on 30 % etanolia. Järjestelmässä joudutaan käyttämään kahta eri lämmönsiirtonestettä ja lämmönsiirrintä paloturvallisuusmääräyksien takia. Lämmöntalteenottojärjestelmä sijaitsee katolla, jolloin lämpötilamuutokset eri vuodenaikoina ovat suuria. Kuumilla keleillä on mahdollista, että etanolipohjainen maalämpöneste pääsee höyrystymään ja voi aiheuttaa näin vaaran paloturvallisuuden kannalta.

Toisaalta olisi myös mahdollista käyttää glykolipohjaista lämmönsiirtonestettä koko järjestelmässä niin, että se kiertäisi Pilpit-laitteen kautta lämpökaivoihin ja sieltä takaisin lämpöpumpuille. Näin järjestelmästä saisi poistettua yhden lämmönsiirtimen, joka aiheuttaa kustannuksia ja hyötysuhdehäviöitä. Tällaisia järjestelmiä on tehty ja kokemusten perusteella glykolipohjainen lämmönsiirtoneste aiheuttaa sakkaantumisoongelmia. Sakkaantuessaan neste aiheuttaa tukkeumia lämpöpumpun höyrystimellä hajottaen höyrystimen. Järjestelmä kannattaa mieluummin rakentaa hieman tehottomammaksi, kuin hakemalla hakea ongelmia tehokkuutta parantamalla. (Hirvonen 2014.)

6 Laskut

6.1 Poistoilmaenergian määrä ja sen hyödyntäminen

Poistoilmasta saatavan tehon määrä pysyy lähes vakiona koko lämmityskauden ajan. Poistettava sisäilma on samassa lämpötilassa jatkuvasti, vaikka ulkolämpötilat vaihtelisivat. Laskentaperusteena käytetään +20 °C:een lämpötilaa, joka PILPIT-laitteella lauhdutetaan +2 °C:een. Laskennassa suhteellisena kosteusprosenttina käytetään 40 %. Näiden arvojen perusteella Mollier-diagrammista saadaan entalpia-

arvoiksi 34 kJ/kg ja 7 kJ/kg, jolloin Δh on 27 kJ/kg. Tämä tarkoittaa, että kun ilmaa lauhdutetaan +20 °C:sta +2 °C:een, saadaan siitä energiaa 27 kilojoulea ilmakiloa kohden käytettäväksi. Ilman tiheytenä käytetään laskennassa 1,2 kg/m³.

Poistoilmamäärän ollessa 0,5 m³/s saadaan kaavan 5 avulla laskettua käytettävissä oleva poistoilman teho:

$$P_{pi} = 1,2 \frac{kg}{m^3} * 27 \frac{kJ}{kg} * 0,5 \frac{m^3}{s} = 16,2 kW$$

Laskennassa täytyy ottaa huomioon lisäksi lämmönsiirtimen hyötysuhde, kun poistoilmaenergia siirretään keruupiirin lämmönsiirtimen kautta lämmönkeruunesteeseen. Lämmönsiirtimen hyötysuhteena laskennassa käytetään 85 %. Tästä laskemalla kokonaistehoksi saadaan:

$$P_{pi} = 16,2 kW * 0,85 = 13,8 kW \quad (7)$$

Poistoilmasta saadaan siirrettyä 13,8 kW:n teho maalämpöjärjestelmän lämmönkeruupiiriin. Tämä teho vaikuttaa lämpökaivomitoitukseen vähentäen lämpökaivojen aktiivisyyttä merkittävästi.

6.2 Lämpökaivomitoitus

Lämpöpumppujärjestelmän mitoituksessa käytetään osatehomitoitusta, jolloin pyritään saamaan mahdollisimman hyvä energianpeitto. Osatehomitoituksen avulla päästään parempiin hyötysuhteisiin kuin täystehomitoituksella. Järjestelmä mitoitetaan peittämään 70 % vuosittaisesta tehontarpeesta, jolloin vuosittainen energianpeitto on 95 % luokkaa. Loput tarvittavasta energiasta kovilla pakkasilla tehdään sähkökattilalla.

Kohteen huipputehontarve on 181 kW, josta 34 kW kuluu käyttöveden lämmittämiseen. Tämä on kuitenkin alle 20 % kokonaistehontarpeesta, jolloin käyttöveden tarvitsema teho tulee järjestelmässä sivutuotteena ja sitä ei huomioida laskennassa. Tästä syystä lämmitysjärjestelmän mitoitus huipputehona käytetään 150 kW:a.

Järjestelmältä vaaditaan, että sen SCOP on vähintään 3,5, jonka avulla voidaan mitoittaa lämpökaivojen aktiivinen kokonaissyvyys. Lämpökaivoista tarvittava teho saadaan laskettua, kun huipputehosta vähennetään lämpöpumpun 3,5-kertoimella ottava sähköteho ja kerrotaan se tehonpeittokertoimella:

$$P = \left(150 \text{ kW} - \left(\frac{150 \text{ kW}}{3,5} \right) \right) * 0,7 = 75 \text{ kW} \quad (8)$$

Kohteessa lämpökaivojen laskennassa käytetään aktiivisyyden tehoarvona 37 W/m. Tämä tarkoittaa, että lämpökaivojen kokonaisaktiivisyvyys tulisi olla:

$$\frac{75000 \text{ W}}{37 \text{ W/m}} = 2027 \text{ m} \quad (9)$$

Tämä on siis kaivojen aktiivisyvyys ilman poistoilmaenergian hyödyntämistä. Kun poistoilman teho otetaan huomioon laskennassa, saadaan kaivojen oikeaksi aktiivisyydeksi:

$$2027 \text{ m} - \left(\frac{13800 \text{ W}}{37 \frac{\text{W}}{\text{m}}} \right) = 1654 \text{ m} \quad (10)$$

Poistoilmaenergiaa hyödyntämällä tässä kohteessa pystytään vähentämään lämpökaivojen aktiivisyyttä 370 metrillä. Kustannuksissa tämä tarkoittaa merkittäviä säästöjä. Lämpökaivojen metrihinta on noin 35 €/m kallioon porattavalta

osuudelta. Kohteessa ei vähennetä lämpökaivojen määrää, vaan lyhennetään kaivojen aktiivisyvyyttä. Kun lasketaan säästöjä kallioporauksen hinnalla, saadaan investointikustannuksia pienennettyä noin 13000 eurolla.

6.3 Kustannusvertailu eri järjestelmien välillä

Työssä vertaillaan lämpöpumppujärjestelmän ja kaukolämpöjärjestelmän käyttökustannuksia 15 vuoden ajalta. Koska kohde on julkinen ja vasta rakennusvaiheessa, ei ole mahdollista saada lämmitysjärjestelmien investointikustannuksia salassapidon takia. Energiakustannusvertailun kautta on kuitenkin mahdollisuus arvioida järjestelmien kannattavuutta toisiinsa verrattuna.

Kaukolämpö ja maalämpö ovat ainoa järkevät lämmitysjärjestelmät kohteeseen, joita kannattaa tarkastella. Esimerkiksi öljyä ei enää edes laskelmissa oteta juurikaan huomioon. Öljy on fossiilinen polttoaine ja sen luonnonvarojen vähenemisen takia hinta nousee rajua vauhtia. Tiukentuneiden määräysten takia varsinkaan julkisella sektorilla ei ole mahdollista tehdä fossiilisiin polttoaineisiin pohjautuvia ratkaisuja. Myös sähkön hinta on niin korkea, ettei ole järkevää rakentaa sähkölämmitysjärjestelmää varsinkaan suurempiin kohteisiin.

Nykyisin suunnittelu- ja tarjousvaiheessa pyritään keskittymään yhä enemmän rakennusten elinkaareen, jonka vuoksi kustannuslaskelmat tehdään melko pitkältä ajalta. Järjestelmien takaisinmaksuajat vaikuttavat merkittävästi siihen, mikä järjestelmä lopulta valitaan. Laskelmissa tulee ottaa huomioon myös energiahinnan nousu, joka on tällä hetkellä 3-4 %. Näissä laskelmissa käytetään 4 % vuotuista hinnannousua. Laskentaperusteena käytetään kohteen kokonaisenergiantarvetta, joka on noin 366 MWh vuodessa.

Lämpöpumppujärjestelmän mitoituksessa käytettiin 3,5 SCOP-arvoa, jonka perusteella lämpöpumpun tarvitsema sähköenergia on:

$$\frac{366 \text{ MWh}}{3,5} \approx 104,5 \text{ MWh} \quad (11)$$

Lisäksi tulee huomioida lisäenergiantarve, jota lämpöpumpuilla ei saada tuotettua. Energianpeiton arvioitiin olevan 95 % kokonaisenergiantarpeesta, joten 5 % täytyy tuottaa sähkövastuksilla. Tämä energiamäärä on:

$$366 \text{ MWh} * 0,05 = 18,3 \text{ MWh} \quad (12)$$

Lämpöpumpujärjestelmän tarvitsema yhteenlaskettu sähköenergian tarve on siis:

$$104,5 \text{ MWh} + 18,3 \text{ MWh} = 122,8 \text{ MWh} \quad (13)$$

Järvenpään alueella sähkö- ja lämpöenergian toimituksesta vastaa Fortum. Fortum tarjoaa asiakkailleen erilaisia sähkösopimusmahdollisuuksia, mutta näissä laskelmissa on käytetty sähkösopimus Keston mukaisia sähköhintatietoja. Kokonaishinta koostuu sähköenergian hinnasta ja kuukausimaksusta, sähköenergian siirtomaksusta ja siirron kuukausihinnasta sekä sähköverosta. Hinnat sisältävät arvonlisäveron 24 %. Taulukkoon 2 on koottu hinnat Fortumin sivuilta, joiden perusteella kustannukset on laskettu. (Hinnastot 2014).

Taulukko 2. Sähkön hintatiedot

Sähkön hinta - Sähkösopimus Kesto	c/kWh	€/kk
Sähköenergian hinta:	5,44	
Energian perusmaksu:		4,02
Sähkön siirtohint:	2,71	
Siirron perusmaksu:		2,95
Sähkövero:	2,36	
Yhteensä:	10,51	6,97

Lämpöpumppujärjestelmän vuosittaiseksi kustannukseksi tulee näillä arvoilla:

$$122800 \text{ kWh} * 0,1051 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + \frac{6,97\text{€}}{\text{kk}} * 12\text{kk} \approx \mathbf{12990\text{€}} \quad (14)$$

Kaukolämpöjärjestelmässä kokonaisenergiatarve tuotetaan kokonaan kaukolämmöllä. Fortumin hinta kaukolämpöenergialle on 68,57 €/MWh. Lisäksi hintaan lisätään tehomaksu, joka lasketaan tehontarpeen mukaan. Tehomaksu lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\frac{4,12\text{€}}{\text{kW}} * 181 \text{ kW} - 5,88\text{€} = 740 \frac{\text{€}}{\text{kk}} \quad (15)$$

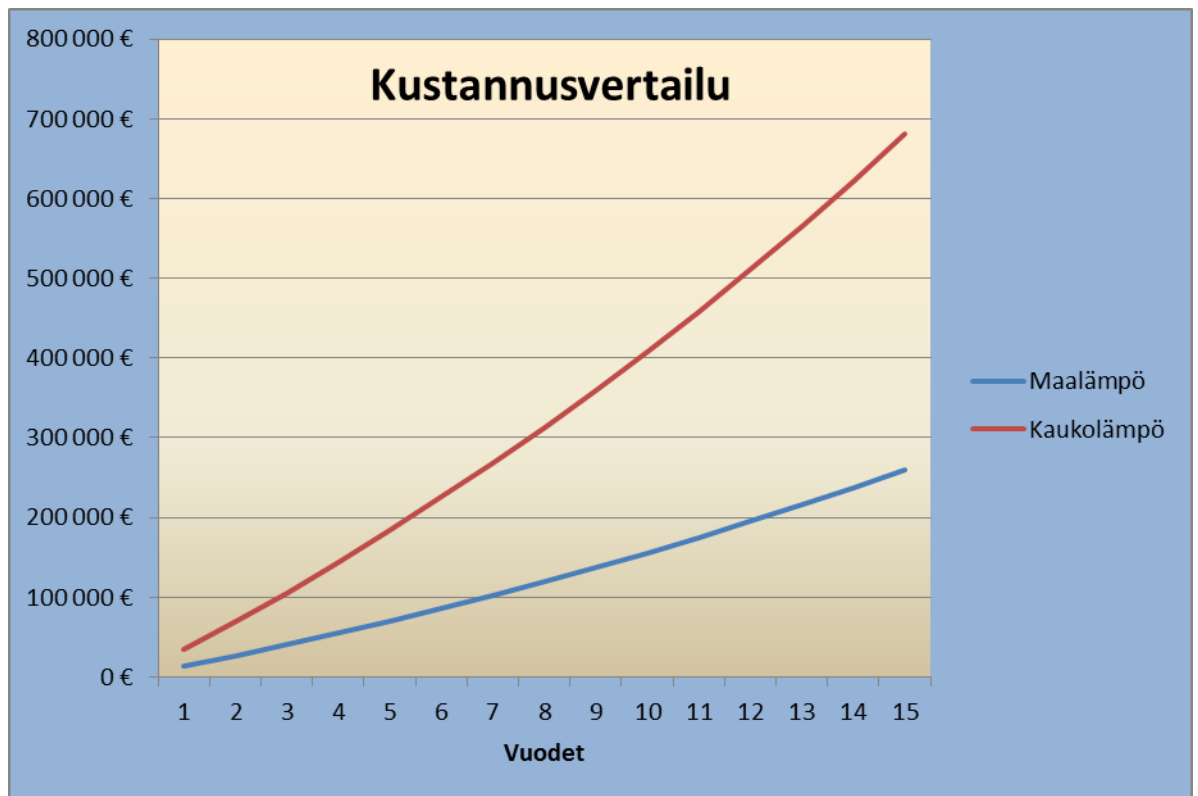
Kaukolämpöjärjestelmässä ei voida soveltaa 20 % sääntöä, koska kaukolämpöjärjestelmään ei kuulu käyttövesivaraajia, johon käyttövesi voitaisi varastoida. Tämän takia laskuissa käytetään huipputehontarvetta. Näillä arvoilla saadaan laskettua kokonaisvuosikustannukset kaukolämpöjärjestelmälle:

$$366 \text{ MWh} * \frac{68,57\text{€}}{\text{MWh}} + \frac{740\text{€}}{\text{kk}} * 12\text{kk} \approx \mathbf{33980\text{€}} \quad (16)$$

Taulukossa 3 on esitetty lämmitysjärjestelmien energiakustannusten kehitystä 15 vuoden aikana, kun oletetaan, että energianhinta kasvaa 4 % vuotuisella vauhdilla. 15 vuoden päästä lämpöpumppujärjestelmän kokonaisenergiakustannukset ovat noin 260 000 €, kun taas kaukolämpöjärjestelmän vastaava energiankustannus on noin 680 000 €. Taulukossa on ilmaistu kunkin vuoden aikana lämmitysenergiaan kuluva euromäärä ja lopuksi laskettu nämä yhteen. Kuviossa 6 sama asia on ilmaistu diagrammin muodossa selventämään energiakustannusten eroja.

Taulukko 3. Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailu 15 vuoden ajalta

Kustannusvertailu		
Vuosi	Lämpöpumppujärjestelmä	Kaukolämpöjärjestelmä
1	12 990 €	33 980 €
2	13 510 €	35 339 €
3	14 050 €	36 753 €
4	14 612 €	38 223 €
5	15 196 €	39 752 €
6	15 804 €	41 342 €
7	16 436 €	42 996 €
8	17 094 €	44 715 €
9	17 778 €	46 504 €
10	18 489 €	48 364 €
11	19 228 €	50 299 €
12	19 998 €	52 311 €
13	20 797 €	54 403 €
14	21 629 €	56 579 €
15	22 494 €	58 842 €
Yhteensä	260 106 €	680 402 €



Kuvio 6. Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailudiagrammi

7 Tulokset

Hyödynnettävissä olevalla 0,5 m³/s poistoilmamäärällä saadaan tuotettua noin 16 kW:n teho, kun poistoilma lauhdutetaan +20 °C asteesta +2 °C asteeseen.

Poistoilmaenergian siirrossa hyötysuhde laskee hiukan, jolloin maapiiriin siirrettävä teho on noin 14 kW. Tällä tehomäärällä saadaan vähennettyä kohteessa lämpökaivojen aktiivisyyttä 370 metrillä, joka investointikustannuksena tarkoittaa 13 000 euron säästöjä. Poistoilman talteenottojärjestelmän investointikustannus asennuksineen on noin 10 000 euroa, joten säästöä ei merkittävästi synny.

Poistoilmaenergian hyödyntämisellä vaikutetaan järjestelmän investointikustannuksiin, kun energia siirretään lämpöpumppujärjestelmän

maapiiriin. Energiakustannuksiin tämä ratkaisu ei vaikuta, koska lämpöpumppujen sähköenergiatarve pysyy samana, oli sitten kyseessä järjestelmä ilman poistoilmaenergian hyödyntämistä tai sen kanssa. Jos kyse olisi kaukolämpöjärjestelmästä, talteenottojärjestelmä vaikuttaisi energiakustannuksiin.

Poistoilman talteenottojärjestelmä on rakennettava niin, että lämpöpumppujärjestelmän maapiirissä kiertää eri neste, kuin lämmön talteenottojärjestelmän puolella, eli järjestelmien välillä on oltava lämmönsiirrin. Keruupiirissä kiertävää etanolipohjaista maalämpönestettä ei voi kierrättää talteenottojärjestelmän kautta paloturvallisuuden takia ilman, että putkistoista tehtäisi paloeristetyt. Kannattavuuden kannalta investointi olisi liian suuri. Myöskään lämmön talteenottojärjestelmän puolella kiertävää glykolipohjaista lämmönsiirtonestettä ei voi käyttää niin, että se kiertäisi myös maapiirissä. On mahdollista, että glykoli sakkaantuu ja tukkii lämmönsiirtimen hajottaen järjestelmän. Tämä mahdollisuus halutaan poistaa jo suunnitteluvaiheessa.

Lämmitysjärjestelmien kustannusvertailussa maalämpöjärjestelmällä saadaan 15 vuoden aikana yli 400 000 euron säästöt verrattuna kaukolämpöjärjestelmään, kun huomioidaan vuosittainen energian hinnannousu. Tämä tarkoittaa, että 15 vuoden tarkastelujakson aikana lämpöpumppujärjestelmän investointeihin voi käyttää 400 000 euroa enemmän, kuin kaukolämpöjärjestelmän investointeihin. Lämpöpumppujärjestelmän investoinnit ovat arviolta puolet tästä, joten se on kannattavampi järjestelmäratkaisu kohteeseen.

8 Johtopäätökset ja pohdinta

Vaikka tässä kohteessa poistoilmaenergian hyödyntämisellä päästään melko pieniin säästöihin, ei se poista sitä tosiasiaa, kuinka paljon energiansäästämahdollisuuksia poistoilmaenergiassa on. Poistoilma on jo kertaalleen lämmitettyä ilmaa, joten sen hyödyntämättä jättäminen on suurta energian hukkaamista. Jo pelkästään 0,5 m³/s ilmamäärällä saadaan aikaan teho, jolla kattaisi lähes kolmen omakotitalon lämmitystehon tarpeen. Merkittäviä säästöjä pystytään tekemään varsinkin suuremmissa rakennuksissa, kuten kouluissa, kerrostaloissa ja toimistoissa, joissa poistoilmavirrat ovat suuria.

Poistoilmaenergian hyödyntämiseen tulisi kiinnittää huomiota jo rakennusten suunnitteluvaiheessa ja sisällyttää se rakennuksen elinkaariajatteluun. Olisi tärkeää, että rakennuksen tilaratkaisuja suunnitellessa huomioitaisi myös rakennuksen energiatehokkuutta parantavat seikat nykyistä paremmin. Usein poistoilman hyödyntämisen ongelmaksi muodostuu energian keräämisen vaikeus, koska poistoilmaputkistot ovat niin etäällä toisistaan. Sama ongelma näkyy tässäkin kohteessa. Poistoilmaa, jolla ei määräyksien takia voi esilämmittää tuloilmaa, on yhteensä lähes 1,5 m³/s verran hyödynnettävissä. Tämän ilmamäärän teho vastaa lähes kolmannesta rakennuksen huipputehontarpeesta. Tästä määrästä saadaan kuitenkin hyödynnettyä lämmitysjärjestelmään vain kolmasosa, koska lopun poistoilman kerääminen ei kannata pitkien putkistojen vuoksi. Ongelma olisi ratkaistavissa paremmalla suunnittelulla niin, että poistoputkistot olisivat koottuna yhteen pisteeseen.

Kustannusvertailun jälkeen kohteeseen paras lämmitysratkaisu on lämpöpumppujärjestelmä. Lämpöpumppujärjestelmällä saadaan huomattavia säästöjä energiakustannuksissa aikaiseksi verrattuna kaukolämpöön. Vaikka lämpöpumppujärjestelmien investointikustannukset ovatkin melko paljon

suuremmat kuin kaukolämpöjärjestelmässä, on energiakustannusten ero niin suuri, että lämpöpumppujärjestelmä kannattaa.

Lisäksi lämpöpumppujärjestelmässä poistoilmaenergian hyödyntäminen on tekniikan kannalta ajateltuna helpompaa, kuin kaukolämpöjärjestelmässä. Kaukolämpöyhtiöille tärkeintä on saada kaukolämpöveden jäähtymä pysymään mahdollisimman hyvänä, jolloin voimalaitosten hyötysuhde pysyy korkeana. Poistoilmaenergiaa hyödynnettäessä kaukolämpöverkon paluupiiriin on mahdollista, että jäähtymä pienenee ja laitoksen hyötysuhde heikkenee. Tämän takia kaukolämpöyhtiöt ovat hieman vastahakoisia poistoilmaenergian hyödyntämiseen.

Täytyy muistaa, että lämpöpumppujärjestelmä on sopiva ratkaisu juuri tähän kohteeseen, ja jossain muualla tilanne voisi olla toinen. Jos maaperä olisi esimerkiksi hiekkapohjaista, nousisivat porauskustannukset kolminkertaisiksi. Silloin lämpöpumppujärjestelmän investointikustannukset nousisivat niin suuriksi, että järjestelmä kannattaisi toteuttaa ennemmin kaukolämmöllä.

Lähteet

Ajankohtaista. N.d. Viitattu 9.5.2014. [Http://www.mestariasunnot.fi/](http://www.mestariasunnot.fi/),

Mestariasunnot Oy.

Energiatehokas ilmanvaihto. 2012. Motivan opas ilmanvaihdon

energiatehokkuudesta. Viitattu 17.4.2014. [Http://www.motiva.fi/](http://www.motiva.fi/), Julkaisut, Koti ja asuminen.

Eskola, L., Jokisalo, J. & Sirén, K. 2012. Lämpöpumppujen energialaskentaopas.

Viitattu 10.5.2014. [Www.ym.fi](http://www.ym.fi), Maankäyttö ja rakentaminen, Lainsäädäntö ja ohjeet, Rakentamismääräyskokoelma.

Hinnastot. 2014. Fortumin energiahinnastot sivuilla. Viitattu 12.5.2014.

[Http://www.fortum.com/countries/fi/pages/default.aspx](http://www.fortum.com/countries/fi/pages/default.aspx), Yksityisasiakkaat.

Hirvonen, J. 2014. Toimitusjohtaja ja energiatekninen asiantuntija. JH-Lämpö Oy.

Haastattelu 9.5.2014.

Ilmanvaihdon perusteet. N.d. Tietoa sisäilmayhdistyksen internet-sivuilla. Viitattu

17.4.2014. [Http://www.sisailmayhdistys.fi/](http://www.sisailmayhdistys.fi/), Perustietoa sisäilmasta.

Installations. N.d. Viitattu 18.4.2014. [Http://gasfitterusa.com/](http://gasfitterusa.com/).

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Helsinki: Edita Prima. Viitattu 9.4.2014.

[Https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4).

Järvenpään Mestariasunnot Oy. N.d. Yrityksen internetsivut. Viitattu 11.3.2014.

[Http://www.mestariasunnot.fi/](http://www.mestariasunnot.fi/).

Kerrostalon lämmöntalteenotto Pilpit-lämmöntalteenottojärjestelmällä. N.d. Viitattu 10.5.2014. [Http://www.pilpit.fi/](http://www.pilpit.fi/), Pilpit.

Maalämpöpumppu. 2013. Tietoa maalämpöpumpuista Motivan sivuilla. Viitattu 8.4.2014. [Http://www.motiva.fi/](http://www.motiva.fi/), Rakentaminen, Lämmitysjärjestelmän valinta, Eri lämmitysmuodot.

Matalaenergiatalon määritelmä. 2013. Viitattu 9.5.2014. [Http://www.motiva.fi/](http://www.motiva.fi/), Rakentaminen, Millainen on energiatehokas pientalo.

Mollier Diagram. N.d. Viitattu 6.5.2014. http://www.engineeringtoolbox.com/psychrometric-chart-mollier-d_27.html.

Nämä ovat Suomen ilmastoystävällisimmät kerrostalot. 2013. Talotekniikka-lehden uutinen. Viitattu 11.3.2014. [Http://talotekniikka-lehti.fi/2013/10/24/suomen-ilmastoystavallisimmat-kerrostalot-on-valittu/](http://talotekniikka-lehti.fi/2013/10/24/suomen-ilmastoystavallisimmat-kerrostalot-on-valittu/).

Petrecca, Giovanni. 1992. Industrial energy management: principles and applications. Viitattu 22.4.2014. [Http://www-3.unipv.it/energy/web/Libro%20petrecca/pdf/capitolododicesimo.pdf](http://www-3.unipv.it/energy/web/Libro%20petrecca/pdf/capitolododicesimo.pdf).

Poistoilmalämpöpumppu. 2013. Tietoa poistoilmalämpöpumpuista Motivan sivuilla. Viitattu 24.4.2014. [Http://www.motiva.fi/](http://www.motiva.fi/), Rakentaminen, Lämmitysjärjestelmän valinta, Eri lämmitysmuodot.

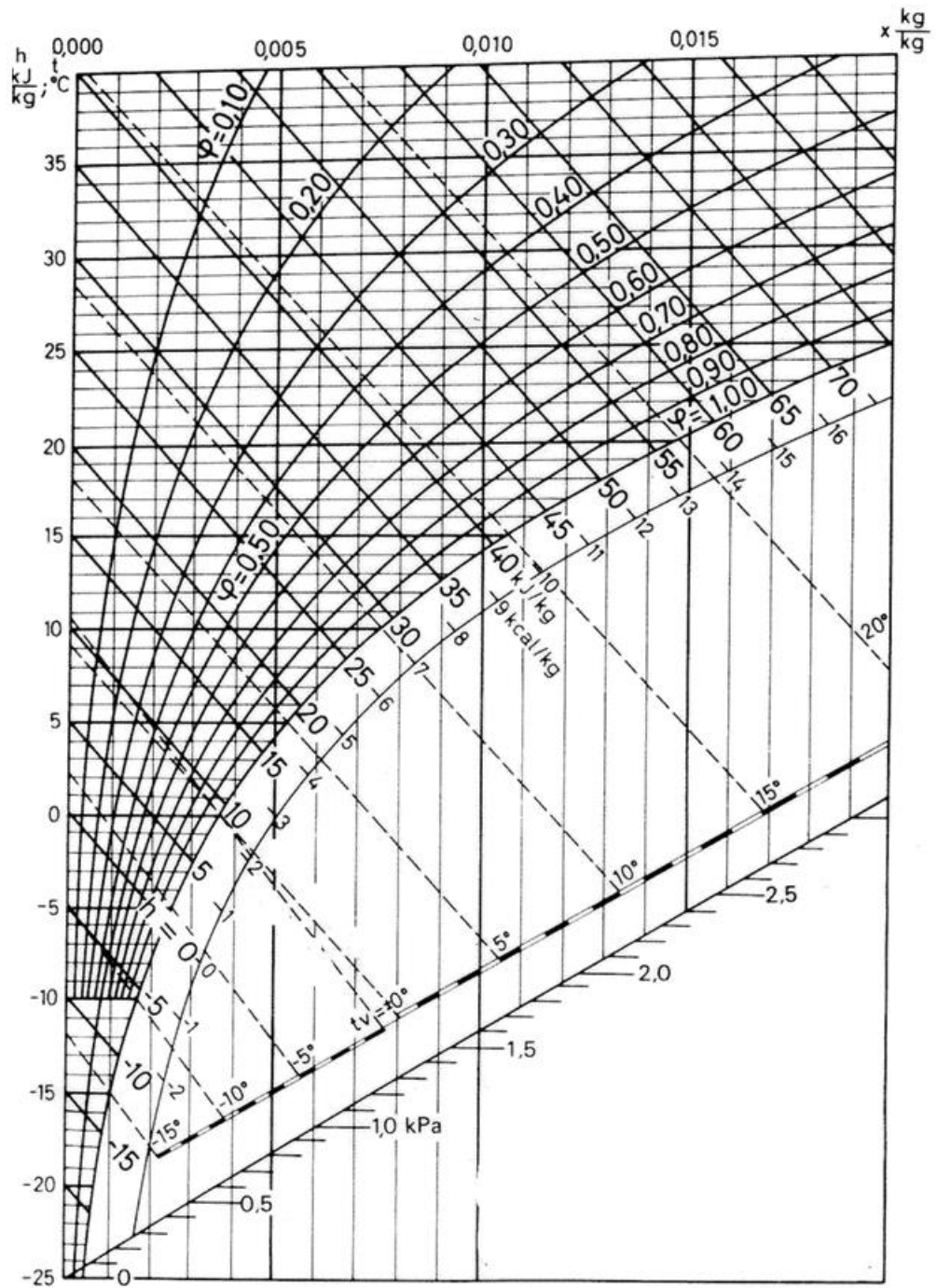
Rotary heat exchanger. N.d. Viitattu 17.4.2014. [Http://www.rotorindustry.com/english.html](http://www.rotorindustry.com/english.html), Rotation recovery.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2: Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet. 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Viitattu 17.4.2014. [Www.ym.fi](http://www.ym.fi), Maankäyttö ja rakentaminen, Lainsäädäntö ja ohjeet, Rakentamismääräyskokoelma.

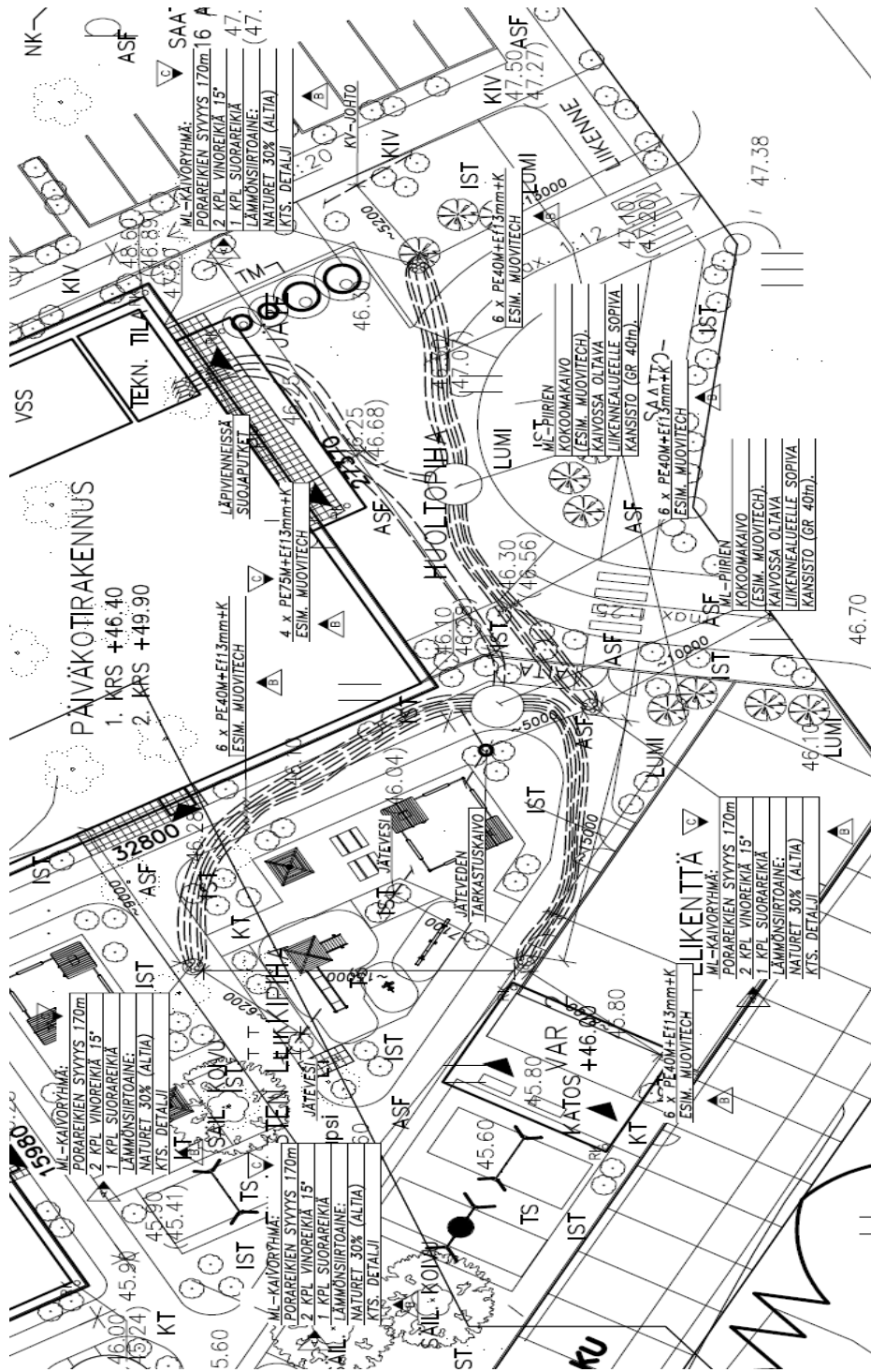
Yleisiä termejä ilmanvaihdossa. N.d. Talotekniikkainfon www-sivusto. Viitattu 24.4.2014. [Http://www.talotekniikkainfo.fi/talotekniikkainfo/](http://www.talotekniikkainfo.fi/talotekniikkainfo/), Sanasto.

Liitteet

Liite 1: Kostean ilman Mollier-diagrammi (Mollier Diagram n.d).



Liite 2: Lämpökaivosuunnitelma



Liite 3: Järjestelmän kytkentäkaavio

