



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**TOMI RIIVARI**  
**POISTOILMALÄMPÖPUMPPU KERROSTALOSSA**

Diplomityö

Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt. Tarkastaja ja aihe hyväksytty Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 5. lokakuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**TOMI RIIVARI:** Poistoilmalämpöpumppu kerrostalossa  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 55 sivua, 0 liitesivua  
Syyskuu 2016  
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Energiatehokkuus  
Tarkastaja: professori Hannu Ahlstedt

**Avainsanat:** poistoilmalämpöpumppu, hybridilämmitys, kerrostalo

Tämän diplomityö tavoitteena oli tutkia ja vertailla poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä erilaisia toteutusperiaatteita kerrostalossa. Vertailussa tutkittiin kiinteistön kokonaislämmityskustannuksien muutoksia eri toteutusperiaatteilla.

Toteutusperiaatteiden vertailussa tutkittiin kolmea eri tapaa ja niiden välisiä lämmityskustannuksia. Vertailtavat tavat olivat lämpöpumpun tuoton maksimointi, poistoilmavirran minimointi ulkoilman lämpötilan mukaan ja ilmanvaihdon pitäminen perinteisellä tasolla.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmät tarvitsevat aina jonkin toisen lämmitysjärjestelmän rinnalleen. Käytettäessä kahta järjestelmään kiinteistön lämmön tuottamiseen puhutaan hybridijärjestelmästä. Hybridijärjestelmässä tarvittava energia pyritään tuottamaan edullisemmalla vaihtoehdolla.

Suosituin lämmitysmuoto kerrostaloissa Suomessa on kaukolämpö. Poistoilmalämpöpumpulla pyritäänkin tuottamaan energiaa kaukolämpöä edullisemmin ja vähentämään kaukolämmön kulutusta. Kaukolämmön kulutuksen minimointi ei saa kuitenkaan olla järjestelmän tarkoitus, vaan tarkoituksena on oltava kiinteistön lämmityskustannusten minimointi asumismukavuudesta tinkimättä. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmä voi vähentää kiinteistön lämmityskustannuksia jopa 40 %. Kannattavuuslaskelmassa järjestelmä osoittautui kannattavaksi investoinniksi.

## ABSTRACT

**TOMI RIIVARI:** Exhaust air pump in a multi-storey building  
Tampere University of Technology  
Master of Science Thesis, 55 pages, 0 Appendix pages  
September 2016  
Master's Degree Programme in Mechanical Engineering  
Major: Energy Performance  
Examiner: Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: exhaust air heat pump, hybrid heating, apartment building

The aim of this Master's thesis was to study and compare different principles of implementation used in an exhaust air heat pump system in apartment buildings. The objects of the comparative study were the different principles of implementation and their individual effect on the total heating costs of a property.

Three different principles of implementation, as well as the heating costs relating to them, were compared. The three different points of comparison were the maximization of the productivity of the heat pump, the minimization of the outgoing airflow and keeping the ventilation on a conventional level.

The exhaust air heat pump system only works together with another heating system. A combination of two heating systems working together to heat a property is called a hybrid system. The aim of using a hybrid system is to produce the required energy in a less expensive manner.

The most popular form of heating used in apartment buildings in Finland is district heating. The purpose of using the exhaust air heat pump is to produce energy in a less expensive way, and to reduce the consumption of district heating. However, minimizing the consumption of district heating should not be the purpose of the system. The purpose should be to minimize the heating costs without compromising any amenities. With the exhaust air heat pump system it is possible to reduce the heating costs with up to 40 %. The profitability calculation proved the system to be an investment worthwhile.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Tampereen teknilliseen yliopistoon osana diplomi-insinöörin tutkintoa. Työn tilaajana oli Topi Riivari Oy. Työ tehtiin vuonna 2016. Diplomityön tekeminen oli antoisa ja opettava kokemus.

Diplomityö päättää yhden vaiheen elämässäni ja avaa samalla monia mielenkiintoisia mahdollisuuksia. Kiitän kaikki työhön osallistuneita ja erityiskiitokset rakentavista kommentteista ansaitsee diplomityön tarkastaja, professori Hannu Ahlstedt.

Turussa, 23.10.2016

Tomi Riivari

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	ASUINKERROSTALON ENERGIAN KULUTUS .....	2
	2.1 Lämpötase .....	2
	2.2 Rakentamismääräykset .....	4
3.	ILMANVAIHTO .....	5
	3.1 Ilmanvaihto .....	5
	3.2 Energiahäviö koneellisessa poistoilmanvaihdossa .....	9
	3.3 Hyödynnettävä energia .....	11
4.	LÄMPÖPUMPPUTEKNIikka .....	13
	4.1 Prosessi .....	13
	4.2 Kylmäaineet .....	15
	4.3 Välillinen järjestelmä .....	16
	4.4 KytKentäperiaatteet .....	17
	4.5 Lämmitysjärjestelmän säätö .....	18
	4.6 Paisunta .....	21
5.	LÄMMÖNKERUUYKSIKKÖ .....	22
	5.1 Prosessi .....	22
	5.2 Keruupatterin mitoitUS .....	24
	5.3 Lamellilämmönsiirrin .....	26
	5.4 LTO-yksikkö .....	28
6.	TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS .....	33
	6.1 Energian kulutus .....	33
	6.2 Järjestelmän toteutusperiaatteet .....	37
	6.3 Eri toteutusperiaatteiden vertailu .....	43
	6.4 Järjestelmän optimointi .....	47
7.	JÄRJESTELMÄN ELINKAARI .....	50
8.	YHTEENVETO .....	53
	LÄHTEET .....	54

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\Delta T_{lg}$	Logaritminen keskilämpötilaero
$a_k$	Lämmönsiirtokerroin
As Oy	Asunto-osakeyhtiö
CFC	Klooria ja fluoria sisältävät kylmäaineet
GWP	Kylmäaineen suhteellinen kasvihuonevaikutus
$q$	Johtumisteho
$q_v$	Kondensoitumisesta aiheutuva lämpövirta
HC	Puhtaita hiilivetyjä sisältävät kylmäaineet
HCFC	Vetyä, klooria ja fluoria sisältävät kylmäaineet
HFC	Vetyä ja fluoria sisältävät kylmäaineet
LTO	Lämmöntalteenotto
LVI	Lämmitys, vesi ja ilmanvaihto
ODP	Kylmäaineen suhteellinen otsonihaitallisuus
$P_L$	Lämmitysteho
$P_J$	Jäähdytysteho
PFC	Fluoria sisältävät kylmäaineet
PILP	Poistoilmalämpöpumppu
Q	Lämmitysenergia
$R_k$	Pintavastuskerroin
$T_L$	Patteriverkoston lämpötila
$T_u$	Ulkoilman lämpötila
$\sigma$	Aineensiirtokerroin
$\epsilon_L$	Lämmitysenergian hinta
$\epsilon_s$	Sähkön hinta

# 1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tavoitteena on tutkia poistoilmalämpöpumpun soveltuvuutta asuinkerrostalon lämmöntalteenottoon. Työssä vertaillaan erilaisia komponenttivalintoja ja erilaisten poistoilmavirran ohjaustapojen vaikutuksia järjestelmän kannattavuuteen.

Energianhinnan jatkuva nousu ja ihmisten kasvava tietoisuus ilmastomuutoksesta luovat pohjan rakennusten energiatehokkuuden parantamiselle. Rakennusten energian kulutus riippuu useasta eri tekijästä. Hyvään kokonaisuuteen päästäkseen on tarkasteltava asioita usealta eri kannalta.

Rakentamismääräykset eivät vaatineet asuinkerrostaloilta poistoilman lämmöntalteenottoa ennen vuotta 2003 (Suomen rakentamismääräyskokoelma 2003). Tästä syystä vanhoissa kerrostaloissa ei ole rakentamisvaiheessa tehty lämmöntalteenottoa. Ilman lämmöntalteenottoa olevan poistoilmanvaihtojärjestelmän osuus kerrostalon energiankulutuksesta on 25- 50 % (Virta ja Pylsy 2011). Poistoilmalämpöpumpulla voidaan saavuttaa merkittävä säästö ostoenergiasta ja tätä kautta kiinteistön lämmityskustannukset alenevat.

Tässä työssä arvioidaan järjestelmän kannattavuutta As Oy Itäviitassa. Yhtiössä on kaksi rakennusta ja molemmissa rakennuksissa on yksi pistepoisto. Pistepoisto tarkoittaa, että rakennuksen poistoilma puhalletaan ulos yhdestä kohdasta. Näin ollen tarvitaan vain yksi lämmönkeruuyksikkö rakennusta kohden.

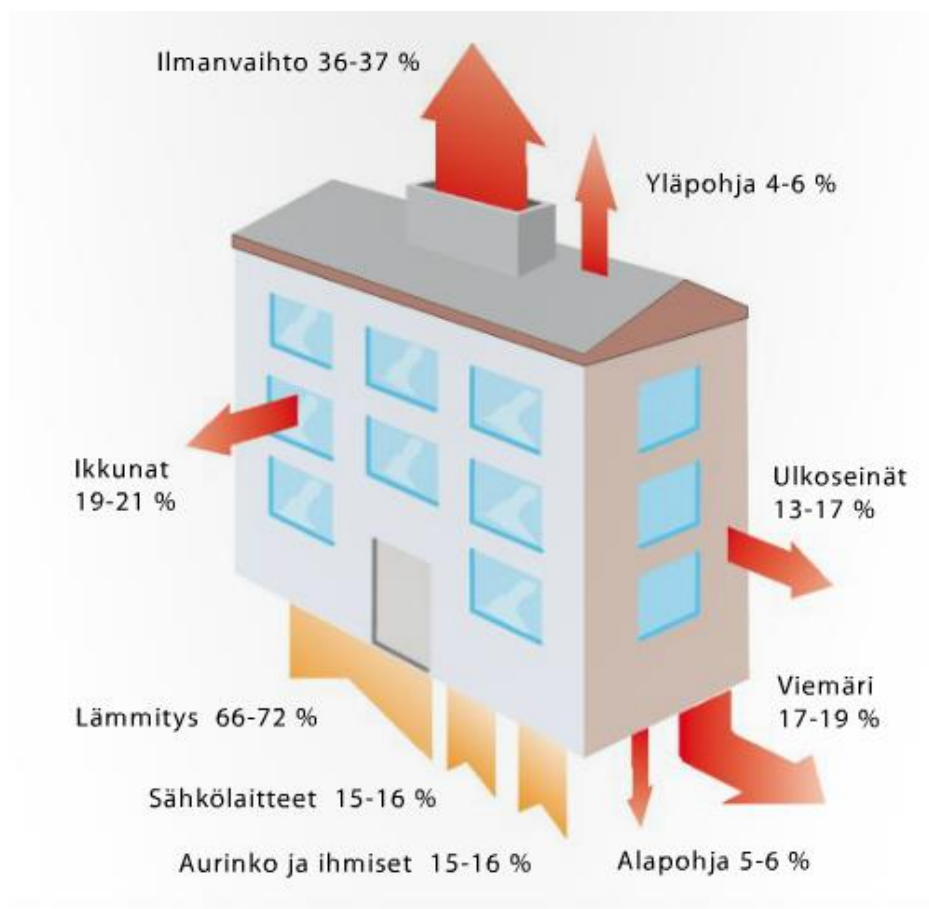
Nykyaikaisissa rakennuksissa poistoilmasta saatavaa energiaa hyödynnetään tuloilman lämmittämiseen. Koneellisen tuloilman rakentaminen vanhaan kiinteistöön on kohtuullisen kallista ja tästä syystä on mielekkäämpää käyttää lämpöpumppua, joka siirtää energian lämmitysverkostoon ja käyttöveteen.

Poistoilmalämpöpumppu ei yksinään pysty lämmittämään koko rakennusta. Lämpöpumppu pystyy tuottamaan merkittävän osa vuotuisesta energiantarpeesta ja järjestelmän rinnalla tulee olla jokin muukin energianlähde. Järjestelmien yhteensovitus tarvitsee riittävän hyvän automaation, jotta vuotuiset säästöt saadaan mahdollisimman suuriksi.

## 2. ASUINKERROSTALON ENERGIAN KULUTUS

### 2.1 Lämpötase

Rakennuksen lämpöhäviöiden ja tulevien lämpöenergioiden jakaantumista havainnollistetaan lämpötaseen avulla (Virta ja Pylsy 2011). Rakennus kuluttaa tietyn määrän energiaa vuodessa ja saman verran energiaa on tuotava rakennukseen. Kuvassa 1 on esitetty tyypillisen 1960-1980 lukujen kerrostalon lämpötaseen muodostuminen.



*Kuva 1. Lämpötase 1960-1980 lukujen asuinkerrostalossa (Virta ja Pylsy 2011).*

Kerrostalossa suurimmat energiahäviöt aiheutuvat ilmanvaihdon korvausilman lämmittämisestä, johtumisesta ikkunoiden ja seinien läpi sekä käyttöveden lämmityksestä. Yläpohjan ja alapohjan läpi energiahäviöt ovat kohtuullisen pienet muihin häviöihin verrattuna. Yläpohjan suhteellisen pieni lämpöhäviö selittyy sillä, että hyvin usein asuntojen



yläpuolinen tila on puolilämmin ja näin myös lämpöhäviö ulos on pieni. Lisäksi yläpohjan eristettä on suhteellisen helppoa lisätä lämpöhäviöiden pienentämiseksi. Alapohja on hyvin usein maavarainen, jolloin lämpötilaero maan ja alapohjan välillä on pienempi kuin seinän ja ulkoilman välillä.

Lämmitysenergian lähteenä kerrostaloissa on useimmiten kaukolämpö, öljy tai maalämpö. Kaukolämpö on koko maassa yleisin lämmitysmuoto. Kaukolämpöä käytetään kerrostaloissa lähes aina, kun sitä on saatavilla. Öljylämmitys on nykyisin jo kohtuullisen harvinainen lämmitysmuoto. Öljylämmitystä on käytössä vielä kaukolämpöverkon ulkopuolella vanhoissa kerrostaloissa. Maalämpö on lämmitysmenetelmistä uusin. Maalämpö ei vielä ole kovinkaan yleinen lämmitysmenetelmä kerrostaloissa, mutta se yleistyy koko ajan (Energiateollisuus 2012).

Tässä työssä keskitytään erityisesti kaukolämmöllä toimiviin kerrostaloihin. Kaukolämmitystä on ollut jo 1950 -luvun alusta alkaen. Kaukolämpöä tuotetaan keskitetysti voimalaitoksissa. Voimalaitoksissa lämmitetään kaukolämpöverkoston vettä haluttuun lämpötilaan ja lämmitetty vesi johdetaan maan alaisissa putkistoissa asiakkaille. Kaukolämpövoimalat käyttävät lämmön tuottamiseen maakaasua, kivihiihtä, turvetta ja uusiutuvia energialähteitä. Kaukolämpöä voidaan tuottaa myös muuten hukkaan menevästä lämpöenergiasta. Erityisesti sähköntuotannossa syntyy suuria määriä ylimääräistä lämpöenergiaa. Sähkön ja lämmön samanaikaista tuotantoa kutsutaan yhteistuotannoksi. Yhteistuotannolla saavutetaan erittäin korkea vuosihyötysuhde (Energiateollisuus 2012).

Kerrostalon lämmitysenergiasta 30-40 % on peräisin ihmisistä, elektroniikasta ja auringosta. Erityisesti auringolla on suuri vaikutus rakennusten lämmönlähteenä. Helsingissä auringon vuosittainen säteilyenergia vaakasuoralle pinnalle on  $975 \text{ kWh/m}^2$ . Aurinkoenergialla pystyttäisiin teoriassa kattamaan kokonaisen rakennuksen vuotuinen energiantarve. Ongelmana aurinkoenergian hyödynnettävyydessä on sen jakautuminen kuukausittain. Talvella lämmöntarpeen ollessa suurimmillaan auringon säteily on kaikkein pienimmillään. Kesällä taas lämmöntarve on vähäinen ja auringosta saatava säteilyenergia suuri. Kesällä auringon säteilyenergia aiheuttaa jopa rakennusten haitallista lämpenemistä (Aurinko-opas 2012).

Ihmistä tuleva lämpö riippuu pitkälti siitä, mitä ihminen tekee. Keskimäärin ihmisen lämmitysteho on noin 70 W. Kovan ponnistuksen aikana ihmisen tuottama teho voi olla hetkellisesti jopa 2 000 W. Ihmisten tuottaman lämmitysenergian määrää voidaan pitää lähes yhtä suurena kuin elektroniikasta tulevaa lämmitystehoa.

## 2.2 Rakentamismääräykset

Rakentamismääräykset määrittelevät rakentamista koskevat yleiset edellytykset, olennaiset tekniset vaatimukset, lupamenettelyt ja viranomaisvalvonnan. Rakentamismääräyksillä pyritään takaamaan rakennusten riittävä laatu ja riittävän pieni energiankulutus. Rakentamista koskevat ohjeet ja säännökset on koottu Suomen rakentamismääräyskokoelmaan (Ympäristöministeriö 2016).

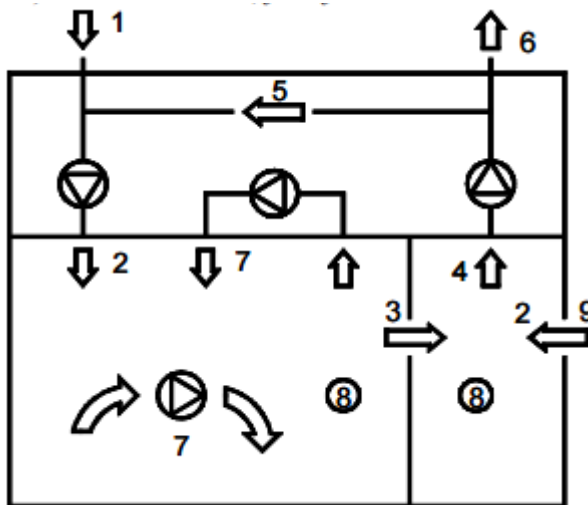
Ensimmäiset rakentamismääräykset on laadittu vuonna 1976. Ensimmäiset rakentamismääräykset koskivat lähinnä rakennuksen LVI-tekniisiä asioita, teknistä dokumentointia, kantavia rakenteita, paloturvallisuutta ja lämmöneristystä. Vuosien saatossa rakentamismääräyskokoelmaa on laajennettu koskemaan mm. esteettömyyttä, asunosuunnittelua ja erilaisia rakenteita. Erityisesti huomiota on kiinnitetty rakennusten energian kulutukseen. Määräykset rakennusten energian kulutuksessa kiristyvät jatkuvasti (Ympäristöministeriö 2016).

## 3. ILMANVAIHTO

### 3.1 Ilmanvaihto

Rakennuksen sisäilman laatu voidaan taata joko ilmanvaihdolla tai ilmastoinnilla. Ilmanvaihdolla tarkoitetaan huoneilman riittävän laadun ylläpitämistä huoneilmaa vaihtamalla. Ilmastoinnilla tarkoitetaan sisäilman laadun riittävää ylläpitämistä tulo- tai kierrätysilmaa käsittelemällä. Ilmastointi vaatii aina koneellisen poistoilmanvaihdon ja lisäksi koneellisen tulo- tai kiertoilmanvaihdon. Lisäksi ilmastoinnissa tulo- tai kiertoilmaa käsitellään halutun sisäilmaston saavuttamiseksi (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).

Ilmavirrat määritellään niiden käyttötarkoituksen mukaan. Ilmavirtoja ovat ulkoilma, tuloilma, siirtoilma, poistoilma, palautusilma, jäteilma, kierrätysilma, sisäilma ja korvausilma. Kuvassa 2 on esitetty ilmavirtojen liikesuunnat ilmanvaihtojärjestelmässä. Kuvassa 1 on ulkoilma, 2 on tuloilma, 3 on siirtoilma, 4 on poistoilma, 5 on palautusilma, 6 jäteilma, 7 kierrätysilma, 8 on sisäilma ja 9 on korvausilma.

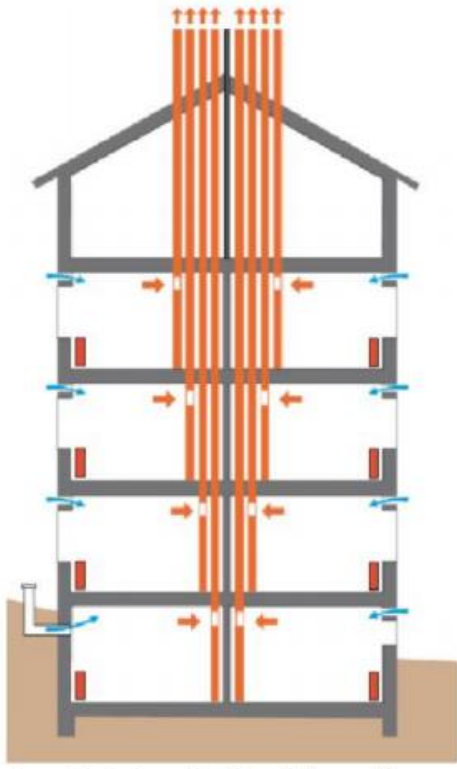


**Kuva 2.** Ilmavirtojen nimitykset (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).

Ulkoilmalla tarkoitetaan koneellisessa tuloilmassa tuloilmapuhaltimelle tulevaa ulkoilmaa. Tuloilmalla tarkoitetaan kiinteistöön puhallettavaa suodatettua ja lämmitettyä ilmaa. Siirtoilmalla tarkoitetaan kiinteistön puhtaista tiloista likaisiin tiloihin siirtyvää ilmaa. Poistoilmalla tarkoitetaan kiinteistöstä poistettavaa ilmaa. Palautusilmalla tarkoitetaan poistoilmasta tuloilmaan siirrettävää suodatettua ilmaa. Jäteilmalla tarkoitetaan kiinteistöstä ulos puhallettavaa poistoilmaa. Kierrätysilmalla tarkoitetaan puhaltimen avulla kiinteistön sisällä kierrätettävää ilmaa. Sisäilmalla tarkoitetaan kiinteistössä sisällä olevaa ilmaa ja korvausilmalla tarkoitetaan ulkoilmasta paine-eron avulla sisälle tulevaa ilmaa.

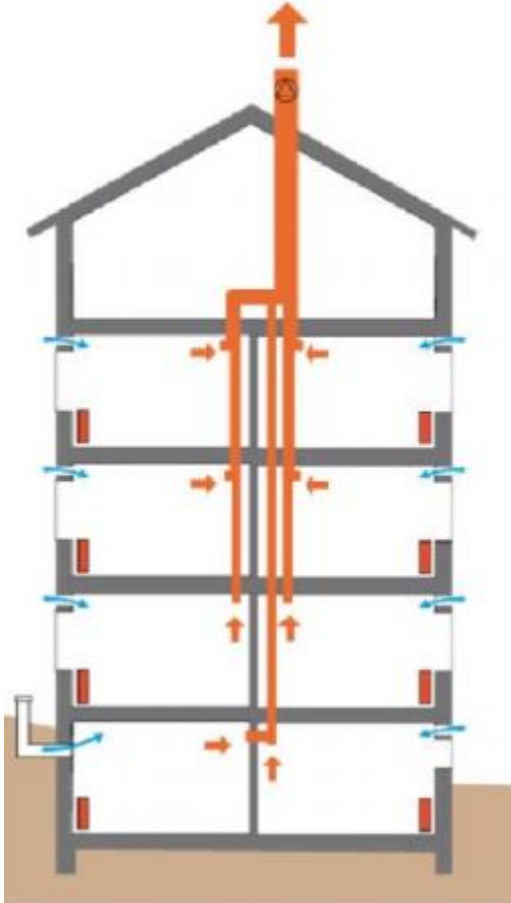
Ilmanvaihto voidaan toteuttaa painovoimaisesti tai koneellisesti. Koneellisessa ilmanvaihdossa käytössä voi olla pelkkä koneellinen poistoilmanvaihto tai koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).

Painovoimaisessa ilmanvaihdossa ilman liike perustuu ulko- ja sisäilman lämpötilaeroihin, korkeuseroihin ja tuulesta johtuviin paine-eroihin. Painovoimaisessa ilmanvaihdossa lämmin sisäilma nousee hormia pitkin ylös aina vesikatolle asti. Tilalle virtaa ulkoilmaa korvausilmareittejä pitkin ja rakenteiden vuotoina. Kuvassa 3 on esitetty painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaperiaate kerrostalossa (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).



**Kuva 3.** Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaperiaate (Taloyhtiön energiakirja 2011).

Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä ilman liike saadaan aikaiseksi poistoilmanpuhaltimella. Jäteilma poistetaan kerrostaloissa yleisesti puhaltamalla se vesikatolle. Poistetun ilman tilalle virtaa ulkoilmaa rakenteiden ilmanvuotona ja korvausilmaventtiilien kautta. Kuvassa 4 on esitetty koneellisen poistoilmanvaihdon toimintaperiaate. Koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä on yleisin ilmanvaihtojärjestelmä 1960-1990 lukujen kerrostaloissa (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).



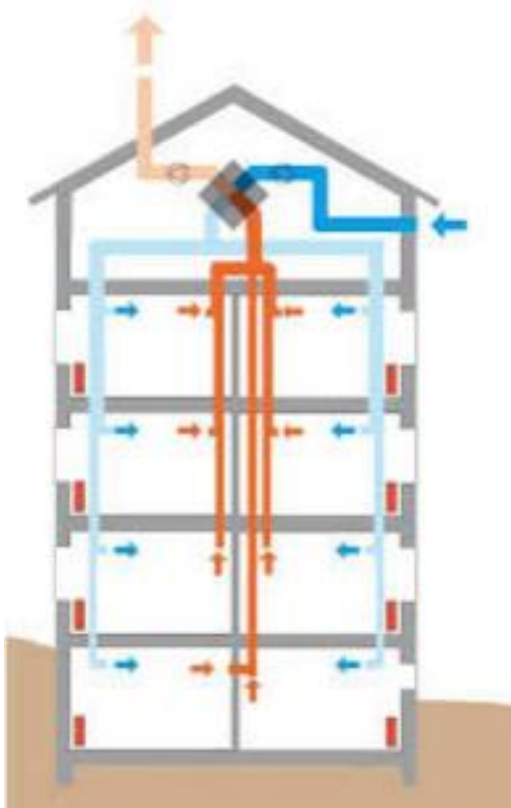
**Kuva 4** Koneellinen poistoilmanvaihto kerrostalossa (Taloyhtiön energiakirja 2011).

Koneellisessa poistoilmanvaihdossa huoneilma pyritään vaihtamaan vähintään kerran kahdessa tunnissa. Ilmanvaihtokerroin on tällöin 0,5 l/h. Käytännössä 1960-1990 lukujen kerrostaloissa poistoilman määrää ohjataan vuorokausikellon avulla. Poistoilmaventtiilit sijoitetaan likaisiin tiloihin. Korvausilma tuodaan puhtaisiin tiloihin, joista ilma kulkeutuu siirtoilmana likaisien tilojen poistoilmaventtiileille. Likaisilla tiloilla tarkoitetaan vesisoja, kylpyhuoneita, keittiöitä ja vaatehuoneita. Puhtailloilla tarkoitetaan oleskelutiloja kuten makuuhuoneita ja olohuoneita (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).

Yleisesti huoneilma pyritään vaihtamaan kerran kahdessa tunnissa silloin, kun asukkaat ovat kotona ja ilmanvaihdolle on tarvetta. Asukkaiden ollessa poissa pudotetaan vaihdettava ilmamäärä yleensä puoleen suunnitellusta. Asukkaiden paikalla oloa ei kerrostaloasunnoissa mitata, vaan tehostusajat perustuvat oletuksiin. Hyvin usein tehostettu ilmanvaihto on päällä aamuisin ja iltaisin (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).

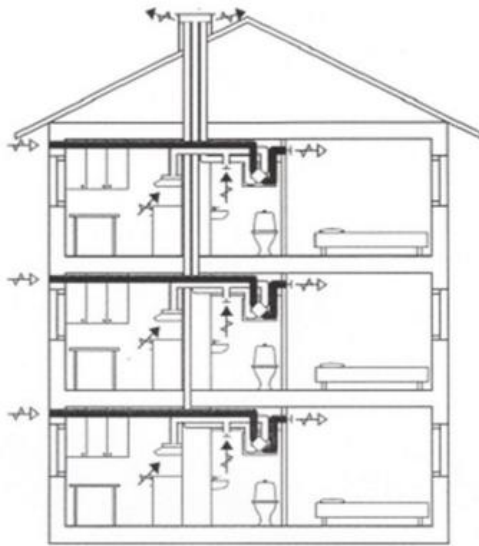
Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa kiinteistön ilmanvaihtokerroin on vähintään 0,5 1/h. Poistoilma kerätään likaisista tiloista ja tuloilma tuodaan puhtaisiin tiloihin. Ilmanvaihtoa voidaan tehostaa ja laskea kiinteistön käyttöasteen mukaan. Järjestelmä on usein varustettu lämmöntalteenotolla. Lämmöntalteenotossa lämpimän poistoilman lämpöä siirretään kylmään tuloilmaan. Tämän jälkeen tuloilma lämmitetään lämmityspatterilla haluttuun lämpötilaan.

Keskitettyssä ilmanvaihtojärjestelmässä kerrostalossa yksi ilmanvaihtokone palvelee useampaa asuntoa. Järjestelmän heikkoutena on tilakohtaisen säätelyn hankaluus. Etuna järjestelmälle ovat pienet huoltokustannukset ja valvonnan helppous. Kuvassa 5 on esitetty keskitetyn ilmanvaihtojärjestelmän toimintaperiaate (Rakentamismääräyskokoelma D2 2012).



**Kuva 5.** Keskitetty tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä (Taloyhtiön energiakirja 2011).

Hajautetussa ilmanvaihtojärjestelmässä jokaisella asunnolla on oma ilmanvaihtokoneensa. Järjestelmän heikkoutena ovat korkeat huolto ja toteutuskustannukset. Etuna keskitettyyn järjestelmään on säätelyn helppous. Jokainen asuinhuoneisto voi itse säädellä ilmamäärää tarpeen mukaan. Kuvassa 6 on esitetty hajautetun ilmanvaihtojärjestelmän toimintaperiaate.



*Kuva 6. Hajautettu ilmanvaihtojärjestelmä (Lamminaho 2012).*

### 3.2 Energiahäviö koneellisessa poistoilmanvaihdossa

Koneellisen poistoilmanvaihdon energiahäviöön vaikuttavat poistoilmamäärä ja korvausilman lämpötila. Tulevan korvausilman määrä on sama kuin rakennuksesta poistettava ilmamäärä. Poistoilma puhalletaan rakennuksesta joko yhdellä tai useammalla puhaltimella ulos. Korvausilma tuodaan asuinhuoneistoihin rakenteiden läpi tai erillisten korvausilmaventtiileiden kautta.

Rakennuksen poistoilman määrään vaikuttaa ilmanvaihdon tarve. Ilmanvaihtoa ohjataan perinteisesti kellokytkimen avulla, jolloin riittävä ilmanvaihto taataan rakennuksen käyttöasteen ollessa korkeimmillaan. Energiansäästösyistä ilmanvaihto pienennetään puoleen suunnitellusta käyttöasteen ollessa pienempi. Kellokytkimen lisäksi ilmanvaihtoa saataan ohjata lämpötilareleen avulla. Ulkoilman lämpötilan alittaessa tietyn lämpötilan, ei lämpötilarelele anna ilmanvaihtokoneen kytkeytyä täydelle nopeudelle. Toiminto vähentää energiankulutusta ja vedon tunnetta asunnoissa. Vedon tunne johtuu kylmästä korvausilmasta. Kylmän korvausilman nopeus saattaa olla liian suuri tullessaan oleskelualueelle. Ongelmaa esiintyy erityisesti, kun käytössä on korvausilmaventtiilit.

Korvausilman lämpötilaa voidaan arvioida ulkoilman lämpötilan mukaan. Lämmitys-tarve muodostuu ulkoilman ja sisäilman lämpötilaerosta. Taulukossa 1 on esitetty ulkoilman keskimääräinen lämpötila Turun seudulla.

**Taulukko 1.** *Ulkoilman keskimääräinen lämpötila Turun seudulla (Rakentamismääräy-kokoelma D2 2012).*

Kuukausi	Ulkolämpötila [°C ]
Tammikuu	-4
Helmikuu	-4,5
Maaliskuu	-2,6
Huhtikuu	4,5
Toukokuu	10,8
Kesäkuu	14,2
Heinäkuu	17,3
Elokuu	16,1
Syyskuu	10,5
Lokakuu	6,2
Marraskuu	0,5
Joulukuu	-2,2

Ilmanvaihdon lämpöhäviötä tarkastellaan kuukausikohtaisesti. Korvausilman lämmitys-tarve oletetaan kokonaan muodostuvan kaukolämmöstä. Tarvittava keskimääräinen läm-mitysteho voidaan laskea kaavalla

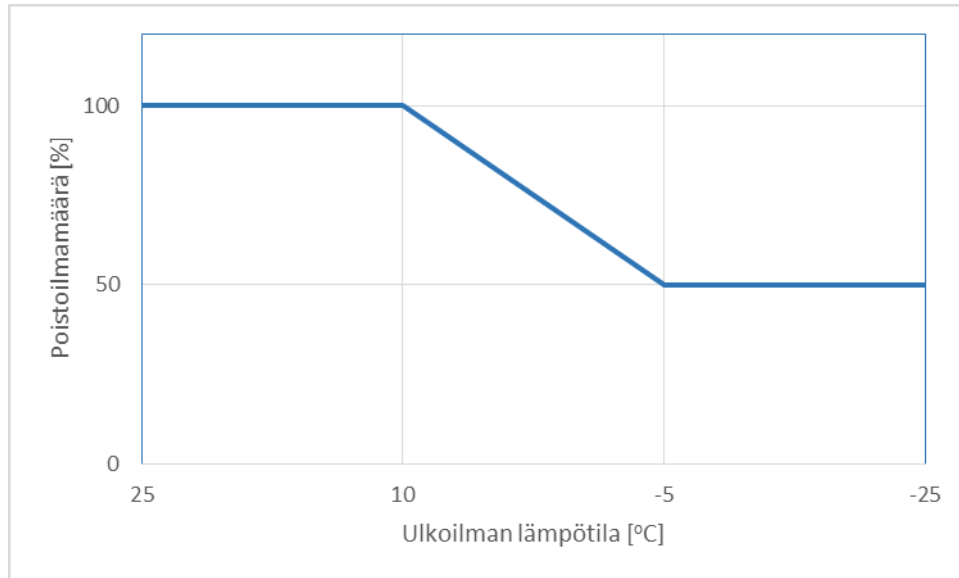
$$P_L = m_i c_i \Delta T, \quad (1)$$

jossa  $m_i$  on ilman keskimääräinen massavirta vuorokauden aikana,  $c_i$  on ilman ominais-lämpökapasiteetti ja  $\Delta T$  on lämpötilaero sisä- ja ulkoilman välillä. Ilman ominaislämpö-kapasiteetti on tässä työssä 1 kJ/kgK. Ilman massavirta lasketaan kertomalla ilman tila- vuusvirta ilman tiheydellä. Tässä työssä ilman tiheys on 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

Poistoilmavirran määrää voidaan säätää usealla eri tavalla. Poistoilman määrä voidaan asettaa täydelle nopeudelle koko ajaksi. Tämä lisää lämmitysenergian tarvetta, mutta toi- saalta lämpöpumpusta saatava energia kasvaa. Eduksi voidaan myös olettaa parempi il- manvaihto asunnoissa ja sitä kautta parempi sisäilman laatu. Toisaalta taas vedon tunne lisääntyy ja asumismukavuus saattaa kärsiä.



Uusin tapa säätää poistoilman määrää on säätää täyden nopeuden ilmamäärää ulkoilman lämpötilan mukaan. Puolitettu poistoilmanmäärä pidetään samanlaisena kuin alkuperäisessä säädössä. Poistoilman täyden nopeuden määrää pudotetaan lineaarisesti ulkolämpötilan mukaan. Pudotus aloitetaan ulkoilman lämpötilan ollessa 10 astetta ja puoleen täyden nopeuden ilmamäärä on pudonnut ulkoilman lämpötilassa -5 astetta. Kuvassa 7 on esitetty poistoilmavirran määrän muutos ulkoilman lämpötilan mukaan.



**Kuva 7.** Poistoilmavirran säätö ulkoilman lämpötilan mukaan.

Kuukausittaisen lämpöhäviön laskennassa on ensin laskettava keskimääräinen vuorokauden lämmitystarve. Kuukauden lämmitystarve  $Q$  lasketaan kaavalla

$$Q = Phd, \quad (2)$$

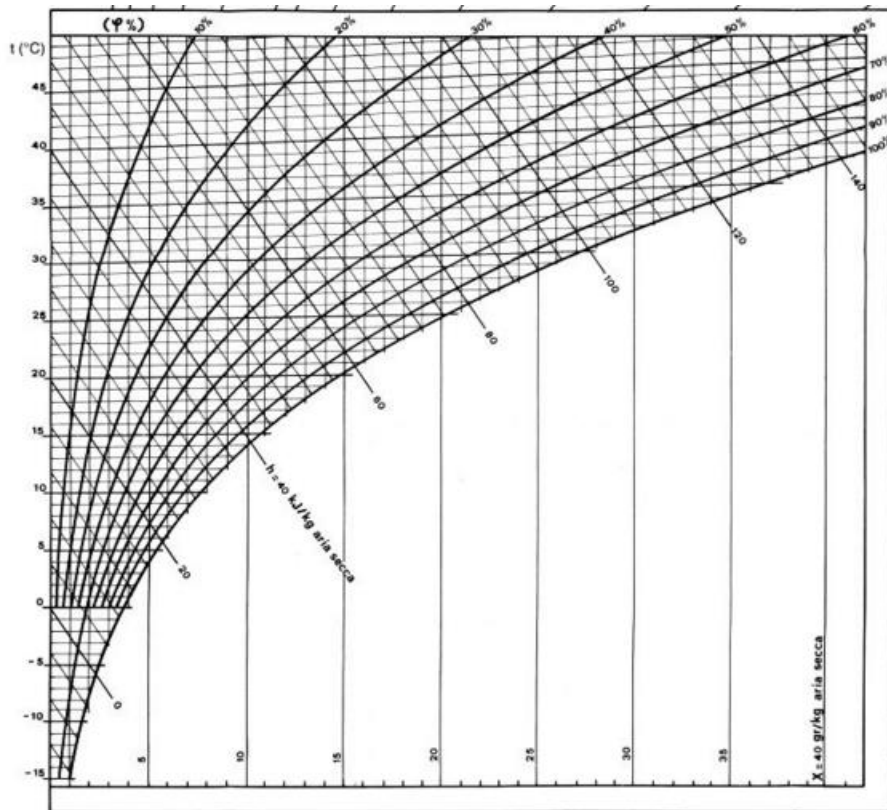
jossa  $P$  on vuorokauden keskimääräinen lämmitysteho,  $h$  on tuntien määrä vuorokaudessa ja  $d$  on vuorokausien määrä kuukaudessa.

### 3.3 Hyödynnettävä energia

Poistoilmalämpöpumpun lämmönkeruunesteellä jäähdytetään poistoilmaa. Prosessissa keruuneste lämpenee ja lämpöpumppu pystyy hyödyntämään kerätyn energian lämmön tuotantoon. Poistoilman luovuttama energia riippuu ilmamäärästä ja ilman entalpian muutoksesta jäähdytyksen aikana (Aittomäki 2012).

Sisäilman lämpötilaksi oletetaan tässä diplomityössä 21 astetta. Lämmön talteenoton jälkeinen lämpötila on 2 astetta. Mikäli poistoilma jäähdytettäisiin pakkasen puolelle, tulisi ongelmaksi keruupatterin huurtuminen ja huurteen sulattamisen tarve. Mikäli sulatus tehtäisiin poistoilman avulla, aiheutuisi prosessiin käyttökatkoja.

Ilman entalpia 21 asteen lämpötilassa riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta. Huoneilman suhteellinen kosteus vaihtelee välillä 20-40 %. Ilman entalpia voidaan lukea kostean ilman  $h,x$ -piirroksista (kuva 8). Ilman entalpia 21 asteen lämpötilassa 20 % suhteellisella kosteudella on noin 29 kJ/kg ja 21 asteen lämpötilassa 40 % suhteellisella kosteudella noin 36 kJ/kg. Molemmissa tapauksissa ilman jäähtyessä 2 asteeseen alitetaan kastepiste. Kastepisteessä ilma on kylläinen vesihöyryn suhteen ja kosteus alkaa tiivistymään ympäröiville pinnoille. Ilman entalpia lämpötilassa 2 astetta 100 % suhteellisella kosteudella on noin 13 kJ/kg. Näin ollen poistoilmasta saatava energia on 23-16 kJ/kg.



**Kuva 8.** Kostean ilman  $h,x$ -piirros (lähde mukailen Aittomäki 2012).

Entalpiaeroa yksinkertaisempi tapa arvioida poistoilman lämmön talteenotosta saatavaa tehoa on kaava

$$P_J = m_i c_i \Delta T, \quad (3)$$

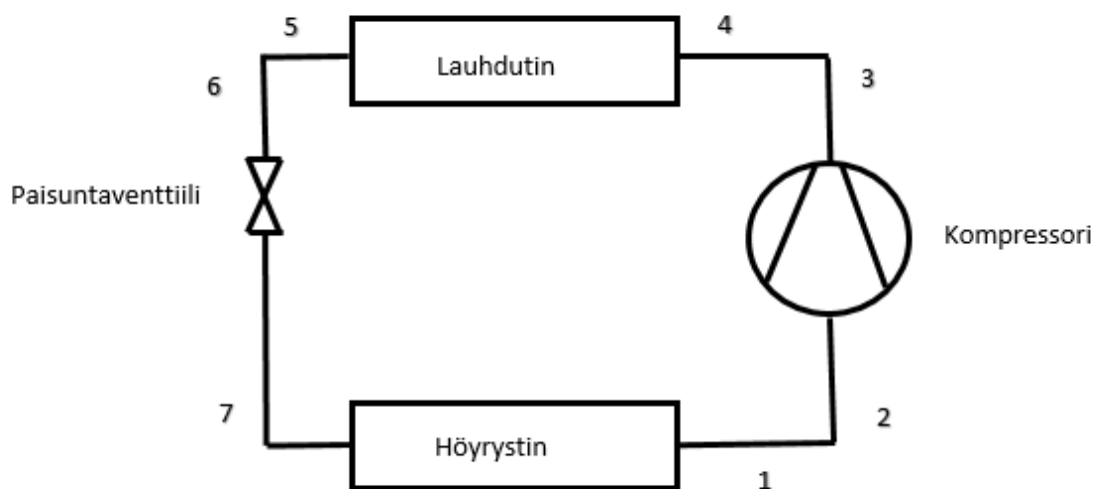
kaava on esitetty jo aiemmin ja ainut muutos korvausilman lämmitystehtoon on lämpötilaero  $\Delta T$ . Tässä työssä poistoilman jäähdystystehon laskennassa  $\Delta T$  on 19 astetta. Kaavalla jäähdystystehoksi saadaan 19 kJ/kg, joka vastaa hyvin lämpötilojen entalpiaeroa. Entalpiaero huomioi ilman kuivumisen, joka on tässä tapauksessa vähäistä (Aittomäki 2012).

## 4. LÄMPÖPUMPPUTEKNIikka

### 4.1 Prosessi

Lämpöpumpulla pyritään siirtämään lämpöenergiaa lämmönlähteestä käyttöön. Poistoilmalämpöpulla jäähdytetään poistoilmaa ja pyritään siirtämään energia mahdollisimman pienillä kustannuksilla lämpimään käyttöveteen ja patteriverkoston.

Lämpöpumppujen toiminta perustuu usein kiertoprosessiin. Kiertoprosessi koostuu yksinkertaisimmillaan kompressorista, höyrystimestä, lauhduttimesta ja paisuntaventtiilistä (Kuva 9). Prosessissa kiertää kylmäaine, joka höyrystyy höyrystimessä sitoen itseensä ulkopuolista energiaa. Höyrystynyt kylmäaine johdetaan kompressoriin, jossa kompressorin tekee työtä ja nostaa kylmäainehöyryn paineen halutulle lämpötilatasolle. Kompressorin jälkeen tulistunut höyry johdetaan lauhduttimeen, jossa kylmäaine lauhduu nesteeksi vapauttaen energiaansa ympäristöön. Lauhtunut kylmäaine johdetaan paisuntaventtiiliin, jossa kylmäaineen paine alennetaan halutulle tasolle ja kylmäaine johdetaan uudelleen höyrystimeen (Aittomäki 2012).



**Kuva 9.** Lämpöpumpun kiertoprosessin kaavio.

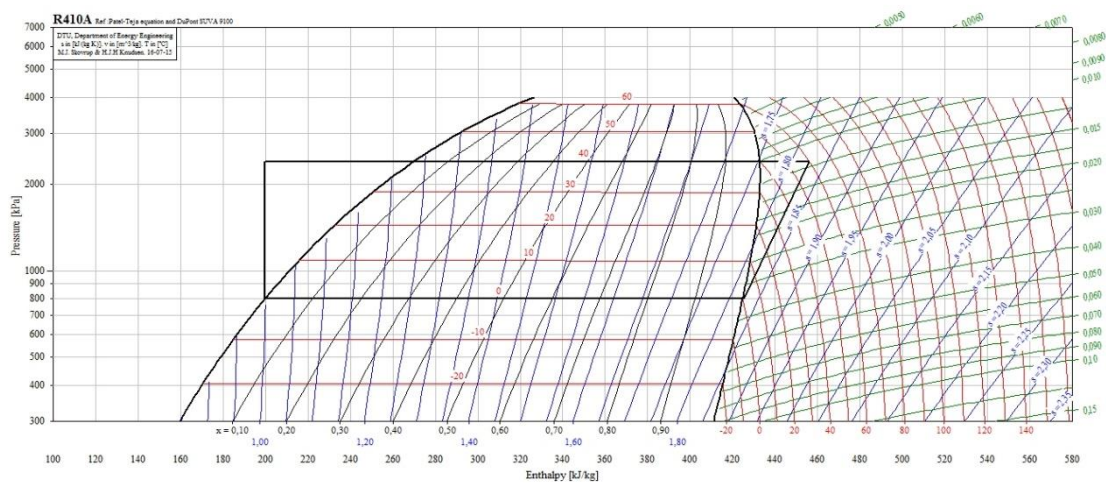
Itseotrooppisilla kylmäaineilla esiintyy lämpötilaliukumaa kylmäaineen höyrystyessä ja lauhduessa. Muilla kylmäaineilla lämpötila pysyy vakiona. Kohdassa 7 kylmäaine on tulossa höyrystimeen ja osa siitä on nesteenä ja osa kaasuna. Pisteessä 1 kylmäaine on täysin höyrystynyt. Kylmäainehöyry tulistuu höyrystimessä ja pisteessä 2 tulistunut höyry johdetaan kompressoriin. Tulistuksella estetään nesteen päätyminen vahingossa kompressoriin. Neste kompressorissa saattaa pahimmassa tapauksessa rikkoa kompressorin.

Tulistunut höyry johdetaan lauhduttimeen pisteessä 3. Tulistunut höyry lauhtuu ja pisteessä 4 höyry ei ole enää tulistunutta. Kylmäaineen lämpötila pysyy vakiona pisteiden 4 ja 5 välillä. Pisteiden 5 ja 6 välillä täysin nestemäinen kylmäaine jäähtyy. Pisteiden 6 ja 7 välillä kylmäaineen paine laskee paisuntaventtiilissä ja pisteessä 7 kylmäaine on osittain nesteenä ja osittain höyrynä (Aittomäki 2012).

Prosessiin tuleva energia riippuu kylmäaineen massavirrasta ja höyrystimessä pisteiden 7 ja 2 välisestä entalpian muutoksesta. Kompressorin tekemä työ paineenkorotuksessa on pisteiden 2 ja 3 välinen entalpian muutos. Prosessista saatava lämpöenergia riippuu massavirrasta ja pisteiden 3 ja 6 välisestä entalpian muutoksesta.

Taloudellisessa mielessä merkittävin lämpöpumpun tunnusluku on lämpökerroin. Lämpökerroin tarkoittaa tuotetun lämpöenergian suhdetta käytettyyn sähkötehoon. Lämpökerroin saadaan laskettua jakamalla pisteiden 3 ja 6 entalpiaero pisteiden 3 ja 2 entalpiaerolla (Aittomäki 2012).

Kiertoprosessin vaiheissa kylmäaineen käyttäytyminen voidaan esittää log p,h-tilapiirroksen avulla (kuva 10). Piirroksessa on esitetty kylmäaineen R410A prosessin käyttäytymistä höyrystyslämpötilalla 0 astetta ja lauhtumislämpötilalla 40 astetta.



**Kuva 10.** R410A logaritminen p,h-piirros.

Käytännön prosessissa lämpökerroin ei pysy vakiona. Nykyaikaisen kompressorin pyörimisnopeutta säädetään jatkuvasti tehontarpeen mukaan. Ominaisuus parantaa merkittävästi järjestelmän kokonaishyötysuhdetta ja lämpökerrointa.

## 4.2 Kylmäaineet

Kylmäkoneistossa käytettäviä kiertoaineita kutsutaan kylmäaineiksi. Kylmäaineet jaotellaan turvallisuutensa perusteella eri ryhmiin. Eurooppalaisen standardin EN 378-1 mukaan palavuusluokat ovat

1. Ilmassa palamattomat
2. Alempi syttymisraja ilmassa on vähintään 3,5 %
3. Alempi syttymisraja ilmassa on alle 3,5 %.

Standardissa EN 378-1 on kaksi myrkyllisyysluokkaa. Myrkyllisyysluokat ovat

- A. Sallittu työpaikkapitoisuus on yli 400 ppm
- B. Sallittu työpaikkapitoisuus on enintään 400 ppm

Kylmäaineilla on suuret vaikutukset ympäristölle. Vaatimuksena kaikille kylmäaineille on haitattomuus ilmakehälle. Tästä johtuen pyritään eroon otsonikatoa aiheuttavista klooria sisältävistä kylmäaineista. Otsonihaitallisuudesta kertoo kylmäaineen ODP-arvo. Mitä korkeampi ODP-arvo kylmäaineella on, sitä haitallisempaa se on. Kylmäaineiden kasvihuonevaikutuksesta kertoo GWP-arvo. GWP-arvo vertaa kylmäaineen kasvihuonevaikutusta puhtaan hiilidioksidin vaikutukseen. Arvolla 1 kylmäaineen vaikutus on sama kuin hiilidioksidin (Aittomäki 2012).

Kylmäaineet voidaan ryhmitellä niiden koostumuksen mukaan usealla eri tavalla. Kylmäaineiden nimeämisessä käytetään kansainvälistä ASHRAEn luokittelua. Nimi koostuu R-kirjaimesta ja numerokoodista. Numerokoodi kertoo kylmäaineen koostumuksen. Ensimmäinen numero luokitukseen saadaan vähentämällä numero 1 C-atomien lukumäärästä. Toinen numero saadaan lisäämällä numero 1 H-atomien lukumäärään. Kolmas numero kertoo F-atomien lukumäärän. Cl-atomeja ei merkitä, vaan loput atomit ovat niitä. Tseotrooppisten kylmäaineiden kanssa käytetään tunnusta R400:sta ylöspäin. Atseotrooppiset seokset nimetään symbolista R500 ylöspäin. Epäorgaaniset yhdisteet nimetään symbolista R700 ylöspäin (Aittomäki 2012).

Kylmäaineiden jaoittelussa voidaan käyttää niiden kemiallista yleisnimeä symbolin R sijaan. Tämä jaoittelu jakaa kylmäaineet viiteen eri ryhmään (Aittomäki 2012).

CFC-kylmäaineet sisältävät klooria ja fluoria. Nämä kylmäaineet ovat hyvin haitallisia ilmastokehälle ja aiheuttavat voimakasta otsonikatoa ja kasvihuoneilmiötä. Tästä syystä näiden käyttö on kiellettyä uusissa laitteissa ja huollossa (Aittomäki 2012).

HCFC-kylmäaineet sisältävät vetyä, fluoria ja klooria. Ne aiheuttavat huomattavaa kasvihuoneilmiötä ja pientä otsonikato. Käyttö on nykyisin kiellettyä uusissa laitteissa ja huollossa (Aittomäki 2012).

HFC-kylmäaineet sisältävät fluoria ja vetyä. Nämä kylmäaineet on kehitetty korvaamaan otsonikatoa aiheuttavia aineita. Ne eivät aiheuta otsonikatoa, mutta niillä on suuria GWP-arvoja. Merkittävä osa nykyisin käytössä olevista kylmäaineista kuuluu tähän ryhmään (Aittomäki 2012).

PFC-kylmäaineet sisältävät ainoastaan fluoria. Eivät ole haitallisia otsonille, mutta niillä on suuria GWP-arvoja. Käyttö uusissa laitteissa kielletty (Aittomäki 2012).

HC-kylmäaineet ovat puhtaita hiilivetyjä. Ne eivät ole haitallisia otsonille ja kasvihuonehaitallisuus on lähes nolla. Täysin luonnonmukaisia kylmäaineita (Aittomäki 2012).

HFO-kylmäaineet ovat yksi mahdollinen tulevaisuuden ryhmä. Eivät ole haitallisia otsonille ja GWP-arvot ovat pieniä. Näiden yhdisteiden turvallisuuteen liittyy vielä epävarmuuksia, eikä niiden hajoamisesta ilmakehässä ole riittävästi tietoa (Aittomäki 2012).

Kylmäaineiden ominaisuudet vaihtelevat paljon. Tämän takia ei ole olemassa yhtä oikeaa kylmäainetta, joka soveltuisi kaikkiin tilanteisiin. Kylmäaineita kehitetään jatkuvasti. Suuntana kehityksessä on ympäristöystävällisyys ja hyvät termodynaamiset ominaisuudet. Hyviä ominaisuuksia kylmäaineelle ovat suuri höyrystymislämpö, pieni painesuhde, pieni viskositeetti, hyvä lämmönjohtavuus, suuri tilavuustuotto ja sopiva höyrynpainealue. Lämpöpumpuissa käytetään yleisesti R407- ja R410-seoksia niiden sopivien ominaisuuksien takia (Aittomäki 2012).

### **4.3 Välillinen järjestelmä**

Valmiit lämpöpumput ovat hyvin usein suljettuja koneistoiltaan. Kylmäaine kiertää ainoastaan laitteen sisällä ja lämmön tuonti lämpöpumpulle toteutetaan keruunesteen avulla.

Perinteisessä suorahöyrysteisessä koneikossa kylmäaineen höyrystin on suorassa yhteydessä jäähdytettävän tilan ilmaan. Järjestelmä on edullinen, mutta vaikeasti muokattavissa jälkepäin. Haluttaessa tarkkaa jäähdytystä vaihtelevalla teholla tulee järjestelmän säädössä haasteita (Aittomäki 2012).

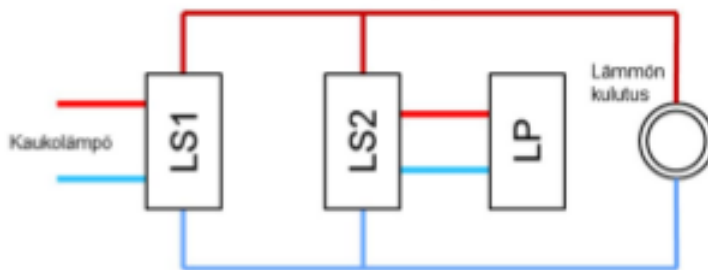
Välillisessä järjestelmässä höyrystin on lämpöpumppuyksikön sisällä. Yksiköstä lähtee keruuputkisto, jossa lämmönkeruuneste kiertää. Välillinen järjestelmä kannattaa, jos tarvittavat putkivedot ovat pitkiä. Välillistä järjestelmää on suorahöyrysteitä järjestelmää helpompi muokata jälkikäteen. Välillisellä järjestelmällä on helppo toteuttaa keskitetty jäähdytysjärjestelmä. Keskitetyssä järjestelmässä yksi jäähdytyskone palvelee useampaa tilaa (Aittomäki 2012).

Välillisen järjestelmän keruu- tai jäähdytysnesteenä voidaan käyttää puhdasta vettä, mikäli ei ole jäätymisvaaraa. Mikäli jäätymisvaara on, tulee keruunesteeseen lisätä riittävä määrä ainetta, jolla saadaan keruunesteen jäätymispiste riittävän alhaiseksi.

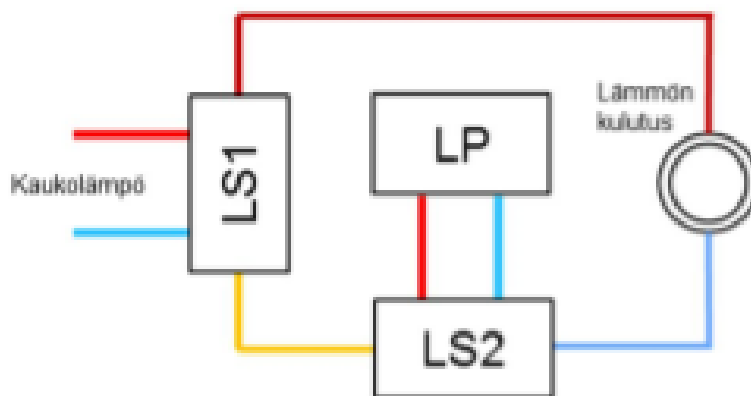
#### 4.4 Kytkentäperiaatteet

Poistoilmalämpöpumpun teho yksinään ei riitä koko kiinteistön energiantarpeen kattamiseen. Tästä syystä on käytettävä myös vaihtoehtoista lämmitysmuotoa. Kerrostaloissa vaihtoehtoisena lämmitysmuotona on hyvin usein kaukolämpö. Poistoilmalämpöpumpun tehtävänä on vähentää kaukolämmön kulutusta ja tätä kautta saada aikaan säästöjä lämmityskustannuksissa.

Poistoilmalämpöpumppu voidaan kytkeä lämmitysjärjestelmään joko rinnan tai sarjaan lisälämmönlähteen kanssa (kuvat 11 ja 12) (Rämä et al. 2015).



*Kuva 11. Lämpöpumpun rinnankytkentä kaukolämmön kanssa (Rämä et al. 2015).*



*Kuva 12. Lämpöpumpun sarjaankytkentä kaukolämmön kanssa (Rämä et al. 2015).*

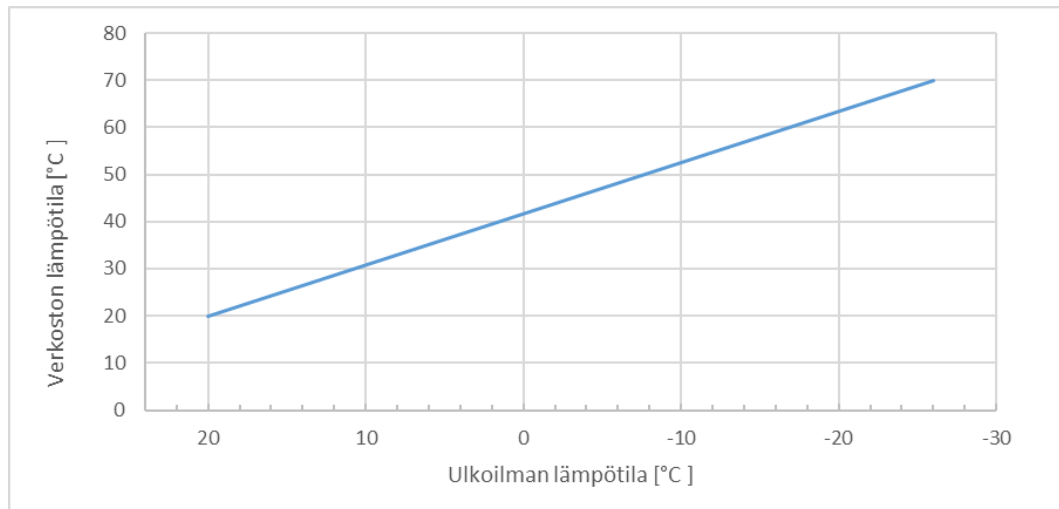
Sarjaankytkennän etuna rinnankytkentään on lämpöpumpun parempi lämpökerroin. Lämpöpumpun lämpökerroin on sitä parempi, mitä pienempi on kylmäaineen höyrystymislämpötilan ja lauhtumislämpötilan erotus. Sarjaankytkennässä kaukolämpö lämmittää

patteriverkoston tai käyttöveden haluttuun lämpötilaan ja lämpöpumppu hoitaa esilämmityksen. Sarjaankytkennän huono puoli on, että se rajoittaa kaukolämmön jäähtymää. Jäähtymän pieneneminen huonontaa energiayhtiön lämmön ja sähkön yhteistuotantoa. Tästä syystä ohjeistukset suosittelevat lämmönlähteiden rinnankytkentää, kun toisena lämmitysjärjestelmänä on kaukolämpö. Mikäli kaukolämmön sijasta käytetään jotain muuta lämmitysmuotoa, on sarjaankytkentä hyvinkin suositeltavaa järjestelmän optimoimisen vuoksi (Rämä et al. 2015).

Rinnankytkennässä vähennetään ainoastaan kaukolämmön kulutusta ja jäähtymä pysyy yhtä suurena kuin ilman poistoilmalämpöpumppua. Kytkennän huonona puolena on lämpöpumpun alhaisempi lämpökerroin ja sitä kautta pienempi säästö (Rämä et al. 2015).

## 4.5 Lämmitysjärjestelmän säätö

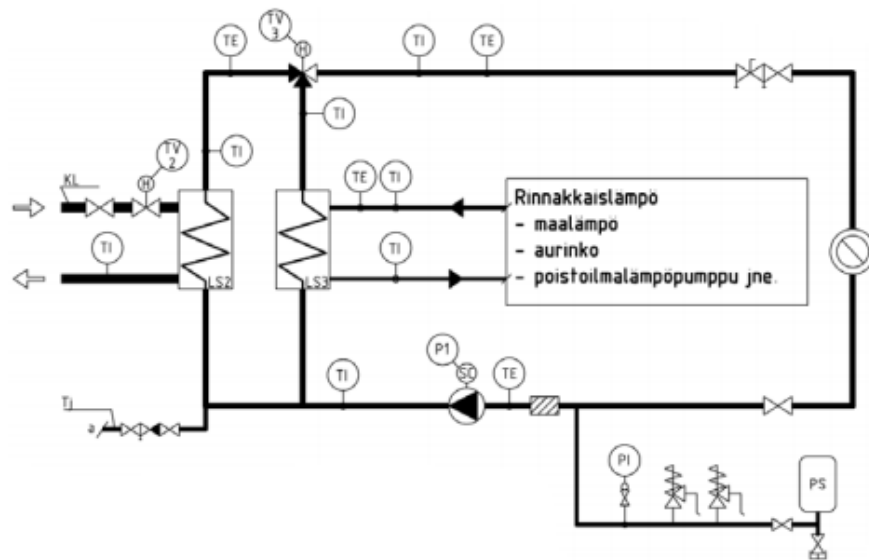
Järjestelmän säädöllä on suuri merkitys vuotuisiin lämmityskustannuksiin. Hyvin usein kerrostalon lämmitysverkoston säätö on toteutettu digitaalisella lämmönsäätimellä. Säädin säätää patteriverkoston menoveden lämpötilaa ulkoilman lämpötilan mukaan. Menoveden lämpötilan säätökäyrä on kiinteistökohtainen. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki säätökäyrästä (Ouman 2016).



**Kuva 13.** Patteriverkoston esimerkkisäätökäyrä (lähde mukailen Ouman 2016).

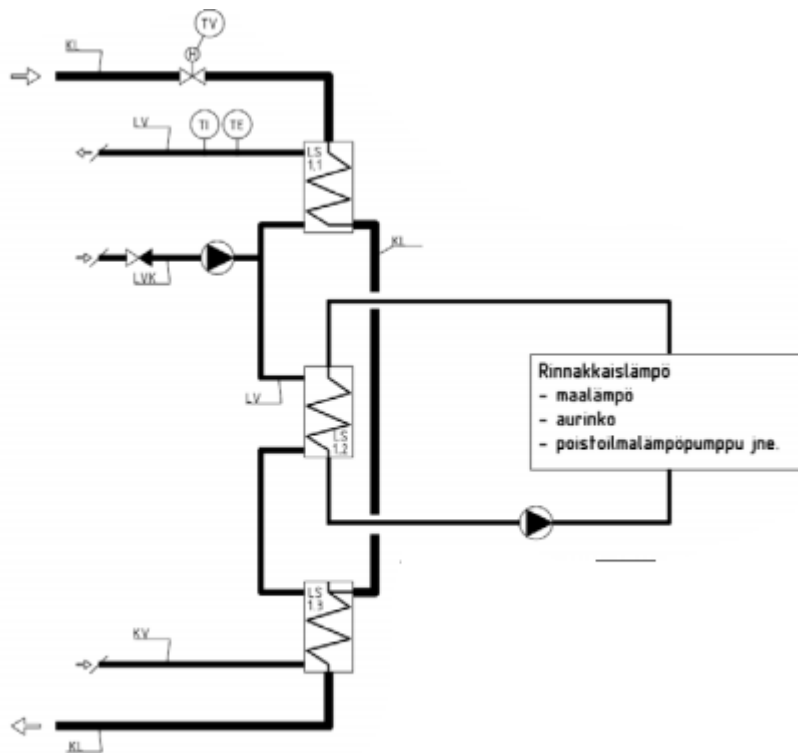


Käytettäessä kahta eri lämmitysjärjestelmää pyritään patteriverkoston tarvitsema lämpö tuottamaan edullisemmalla vaihtoehdolla. Ensisijaisena lämmönlähteenä poistoilmalämpöpumpulla varustetussa järjestelmässä on poistoilmalämpöpumppu. Poistoilmalämpöpumpun teho riittää lämpimillä ulkoilman lämpötiloilla. Mikäli poistoilmalämpöpumpun teho ei riitä, kytkeytyy kaukolämpö sen rinnalle toimintaan. Järjestelmän kytkentä antureineen on havainnollistettu kuvassa 14. Kuvassa menoveden lämpötilaa mitataan lämpötila-anturilla TE. Lämpöpumppu pyrkii lämmittämään kiertoveden haluttuun lämpötilaan varaajassa. Lämmönlähteen säätö toteutetaan kolmitieventtiilillä TV3. Kolmitieventtiili sekoittaa poistoilmalämpöpumpun varaajalta ja kaukolämmön siirtimeltä tulevaa vettä halutun lämpötilan saavuttamiseksi. Poistoilmalämpöpumpulla tuotetun veden lämpötilan ylärajana pidetään tässä työssä 60-astetta. Mikäli patteriverkoston paluuv veden lämpötila ylittää tämän, joudutaan kaikki energia tuottamaan kaukolämmöllä.



*Kuva 14. Järjestelmän kytkentä antureineen (Energiateollisuus 2014).*

Lämpimän käyttöveden lämpötilan on oltava vähintään 55 astetta ja korkeintaan 65 astetta. Yleisesti järjestelmässä käyttövesi on 58-60-asteista lämmönsiirtimen jälkeen. Lämpimän käyttöveden kulutus vaihtelee suuresti vuorokauden ajan mukaan. Tavallisesti lämpimän veden tarve on suurin illalla ja aamulla ihmisten käydessä suihkussa. Poistoilmalämpöpumppu pystyy tuottamaan 60-asteista vettä kohtuullisen hyvällä lämpökertoimella. Korkeasta lämpötilasta johtuen lämmintä käyttövettä kannattaa lämpöpumpulla tuottaa vain, jos patteriverkostossa ei ole lämmöntarvetta. Lämpimän käyttöveden tarpeen suuresta vaihtelusta johtuen, tulee lämpöpumpun kanssa käyttää riittävän suurta varaajaa, jolla voidaan luoda riittävä puskuri kulutuspiikkejä varten. Mikäli poistoilmalämpöpumpun teho ei riitä käyttöveden tarpeeseen, kytkeytyy kaukolämpö toimimaan sen rinnalle. Kuvassa 15 on havainnollistettu poistoilmalämpöpumpun kytkentä antureineen ja säätölaitteineen lämpimän käyttöveden verkostoon rinnan kaukolämmön kanssa kytkentäohjeen mukaan (Energiateollisuus 2014).



**Kuva 15.** Järjestelmän kytkentä antureineen (Energiateollisuus 2014).

Kytkentäohjeen K1/2013 mukaan rinnakkaislämmönlähdettä käytetään kaukolämmöllä esilämmitetyn kylmän käyttöveden lämmittämiseen. Edullisempi tapa olisi kytkeä rinnakkaislämmönlähde kokonaan rinnan kaukolämmön kanssa samaan tapaan kuin lämmitysverkossa. Tällöin kaukolämmöllä voidaan tuottaa 65-asteista vettä, joka sekoitetaan haluttuun lämpötilaan kolmitieventtiilillä rinnakkaislämmön tuoton kanssa. Kytkentä saattaa jopa parantaa kaukolämmön jäähtymää.

## 4.6 Paisunta

Nesteiden tiheys vaihtelee lämpötilan mukaan. Tyypillisesti nesteet laajenevat lämmitettäessä. Tiheyden muutos aiheuttaa suljetussa järjestelmässä kokoonpuristumattomilla nesteillä suuren paineenmuutoksen. Painemuutos aiheuttaisi järjestelmään vuotoja heikoimmissa komponenteissa. Paineenmuutosta vähennetään lisäämällä järjestelmään paisuntajärjestelmä, joka käytännössä antaa nesteelle tilan laajentua (LVI 11-10329 2001).

Paisuntajärjestelmä voi olla avoin tai suljettu. Avoimessa järjestelmässä paisuntasäiliöllä on yhteys ulkoilmaan ja järjestelmä on paineeton. Ainoat paineenmuutokset johtuvat hydrostaattisesta paineesta, ulkoilman paineen muutoksista ja pumppujen tekemästä työstä.

Suljetussa järjestelmässä neste ei ole suorassa kosketuksessa ulkoilmaan. Järjestelmä varustetaan erillisellä paisuntasäiliöllä. Paisuntasäiliön yläosassa on kaasua tai erillinen kalvo, joka puristuu kasaan nesteen tilavuudenmuutoksen myötä. Erilaisia suljettuja järjestelmiä ovat kalvopaisunta-astia, kaasutäytteiset paisuntasäiliöt, kompressoritoimiset paisuntasäiliöt ja pumpputoimiset paisuntasäiliöt (LVI 11-10329 2001).

Paisuntasäiliön kokoon vaikuttavat järjestelmän tilavuus ja nesteen lämpölaajenemiskerroin. Paisuntasäiliön tilavuudesta 80-90 % on hyötytilavuutta, joka voi vastaanottaa nesteen laajenemisen. Asuinkerrostalon poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä paisuntasäiliöllä varustettavia kiertoja ovat lämmitysverkoston vesikierto, lämpimän käyttöveden kierto ja lämpöpumpun keruuputkiston kierto (LVI 11-10329 2001).

Paisuntajärjestelmä varustetaan varoventtiileillä liian korkeita paineita varten. Varoventtiili avautuu viimeistään järjestelmän koeponnistusaineessa. Varoventtiili estää häiriötilanteissa muiden komponenttien vahingoittumisen. Järjestelmään suositellaan aina vähintään kahta varoventtiiliä vikatilanteiden varalle. Varoventtiilit varustetaan ulospuhallusputkella. Ulospuhallusputki johtaa nesteen tai höyryn haluttuun paikkaan. Ympäristölle vaarallisten nesteiden keräyksestä on huolehdittava myös varoventtiileiden kanssa (LVI 11-10329 2001).

## 5. LÄMMÖNKERUUYKSIKKÖ

### 5.1 Prosessi

Lämmönsiirtimessä poistoilmalämpöpumpun keruuneste jäädyttää ulos puhallettavaa poistoilmaa. Keruuneste sitoo itseensä yhtä paljon energiaa kuin poistoilma luovuttaa. Keruunesteen lämpötilan muutos riippuu jäähdystehosta, keruunesteen ominaislämpökapasiteetista ja massavirrasta.

Lämpö siirtyy poistoilmasta keruunesteeseen johtumalla. Johtumisesta voidaan puhua myös lämmön virtauksena. Johtuminen vaatii lämpötilaeron kahden aineen välille ja tämä lämpötilaero pyrkii tasoittumaan. Lämpötilaeron lisäksi lämpövirran voimakkuus riippuu rakenteen paksuudesta ja lämmönläpäisykerroimesta. Rakenteen lämmönläpäisykerroin on käänteinen sarjavastusten summaan. Lämmöneruuyksikön valmistaja määrittää lämmönsiirintä varten lämmönläpäisykerroimen (Aittomäki 2012).

Johtumisen teho voidaan laskea kaavalla

$$q=U\Delta T, \quad (4)$$

missä  $q$  on teho,  $U$  on lämmönläpäisykerroin ja  $\Delta T$  on lämpötilaero.

Konvektio on kiinteän pinnan ja ohivirtaavan kaasun tai nesteen välillä tapahtuvaa lämmön siirtymistä. Lämpöä siirtyy kiinteään pintaan tai kiinteästä pinnasta pois kun pinnan ja virtaavan aineen välillä on lämpötilaero. Pinnan ja aineen välille syntyy rajakerros, jonka paksuus ja muoto riippuvat aineiden ominaisuuksista, pinnan geometriasta, virtaus-tyypistä ja virtauksen nopeudesta (Aittomäki 2012).

Konvektio voi olla tyypiltään joko luonnollinen tai pakotettu. Luonnollisessa konvektiossa virtaus saa liike-energiansa painovoimasta. Nesteen tai kaasun sisälle syntyy lämpötilaeroja, niistä aiheutuu tiheyden muutos eri kerroksissa. Tiheysero synnyttää paine-eron ja paine-erosta johtuen neste tai kaasu virtaa ylös tai alas kiinteää pintaa pitkin. Pakotetussa konvektiossa paine-ero saadaan aikaan ulkoisella toimilaitteella. Hyvin usein ulkoinen toimilaite on pumppu tai puhallin (Aittomäki 2012).

Lämmönsiirron tehoa voidaan kuvata lämmönsiirtokertoimella samaan tapaan kuin johtumisessa. Tehoa voidaan arvioida kaavalla

$$q=\alpha\Delta T, \quad (5)$$

jossa  $q$  on teho,  $\alpha$  on lämmönsiirtokerroin ja  $\Delta T$  on lämpötilaero pinnan ja ohi virtaavan nesteen tai kaasun välillä lämpötilaero. Lämmönsiirtokertoimen käänteisarvo on pintavastus  $R$ .  $R_k$  kuvaa koko rakenteen sarjassa yhteenlaskettua vastusta (Aittomäki 2012).

Kondensoitumisella on huomattava merkitys konvektion voimakkuuteen. Kondensoitumisella tarkoitetaan ilman muuttumista kylläiseksi vesihöyrystä ja tästä johtuvaa vesihöyryn tiivistymistä pinnoille. Kondensoitumista tapahtuu, kun lämmönsiirtimen pinnan lämpötila alittaa kastepisteen. Vesihöyryn tiivistyessä pinnalle tapahtuu veden faasinmuutos höyrystä nesteeksi. Faasinmuutoksesta vapautuva energia siirtyy lämmönsiirtimen kautta keruunesteeseen (Aittomäki 2012).

Kondensoitumisesta aiheutuvaa lämpövirtaa voidaan arvioida Lewisin lain avulla

$$q_v = l_h \sigma (x - x'), \quad (6)$$

missä  $l_h$  on veden höyrystymislämpö,  $x$  on ympäröivän ilman kosteus,  $x'$  on pinnan lämpötilaa vastaavan ilman kylläisen tilan kosteus ja  $\sigma$  on aineensiirtokerroin. Lisäämällä arvon  $q_v$  lämmönsiirtimen tehoon saadaan kokonaislämmönsiirtoteho. Aineensiirtokerrointa kostealle ilmalle voidaan arvioida kaavalla

$$\sigma = l_h (x - x') / (c_p [t - t_p]), \quad (7)$$

missä  $c_p$  on ilman ominaislämpö,  $t$  on ilman lämpötila ja  $t_p$  on pinnan lämpötila (Aittomäki 2012).

Höyrystimen pintalämpötilan ollessa alle 0 astetta alkaa kondensoitunut vesi jäätymään höyrystimen lämmönsiirtopinnoille. Alussa kertyvän jään lisätessä keruupatterin pinta-alaa paranee myös prosessin lämmönsiirtokerroin. Jään lisääntyessä kuitenkin patterin painehäviö kasvaa ja ilmamäärä pienenee. Tämän vuoksi siirrettävä teho pienenee ja prosessin energiankulutus kasvaa.

Poistoilmalämpöpumpussa paras tapa jään sulatukseen on luonnollinen sulatus. Luonnollisessa sulatuksessa lämmönsiirtoprosessi keskeytetään ja annetaan lämpimän poistoilman sulattaa jäätyneet lämmönkeruuyksikkö. Sulatuksen aiheuttaman käyttökatkon pituus on tyypillisesti 20-60 minuuttia (Aittomäki 2012).

Sähkösulatuksessa patteriin on kytketty sähkövastuksia, jotka kytketään päälle tarpeen vaatiessa. Sähkösulatuksen aiheuttama käyttökatkon pituus on tyypillisesti 15-30 minuuttia. Sähkösulatusta käytetään yleisesti kun ympäristön lämpötila on alle +2 astetta. Sähkösulatus on edullisin menetelmä, mikäli luonnollinen sulatus ei ole vaihtoehto (Aittomäki 2012).

Kuumakaasusulatuksessa kompressorin puristama kuuma, höyrystynyt kylmäaine johdetaan höyrystimelle. Kylmäaine luovuttaa lämpöä lauhtuessa ja sulattaa höyrystimen. Kuu-

makaasusulatus käytetään suurissa laitoksissa, joissa sähköinen sulatus tulisi energiankulutukseltaan kalliiksi. Kuumakaasusulatus ei sovellu välillisiin järjestelmiin, joissa erillisellä keruunesteellä kerätään lämpöä talteen. Asuinkerrostalon poistoilmalämpöpumpujärjestelmässä kuumakaasusulatus vaatisi kompressorin asentamista poistoilmakammioon. Järjestelmästä pitäisi tehdä suorahöyrysteinen. Hyvin usein kompressoria on mahdotonta sijoittaa tilan puutteen vuoksi näin (Aittomäki 2012).

Vesisulatuksessa jäätyneelle lämmönkeruuyksikölle johdetaan 10-20-asteista vettä. Liian kuuma vesi aiheuttaa tarpeetonta vesihöyryä ja liian kylmä vesi tekee sulatuksesta tarpeettoman hidasta. Vesimäärät ovat yleensä suuria. Veden suuresta määrästä johtuen on kiinnitettävä huomiota veden ja sulaneen jääsohjon poistamiseen tiloista. Vesisulatusta käytetään pakastimien yms. laitteiden sulatuksessa (Aittomäki 2012).

## 5.2 Keruupatterin mitoitus

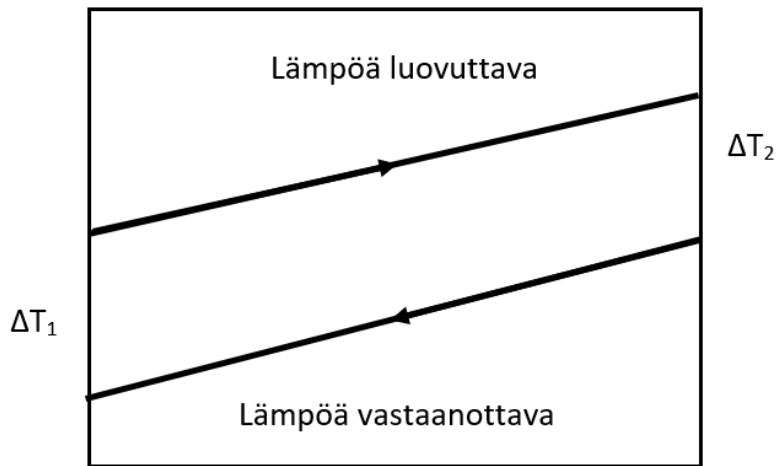
Lämmönsiirtimen teho riippuu siirtimen pinta-alasta, lämmönsiirtymiskertoimesta ja lämpötilaeroista. Lämpötilaero muuttuu prosessin aikana. Keruuneste lämpenee ja poistoilma jäähtyy. Keskimääräinen lämpötilaero voidaan arvioida logaritmisena keskilämpötilaerona. Logaritminen keskilämpötilaero lasketaan kaavalla

$$\Delta T_{lg} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1), \quad (8)$$

missä  $\Delta T_{lg}$  on logaritminen keskilämpötilaero,  $\Delta T_1$  on lämpötilaero prosessin alussa ja  $\Delta T_2$  on lämpötilaero prosessin lopussa (Aittomäki 2012).

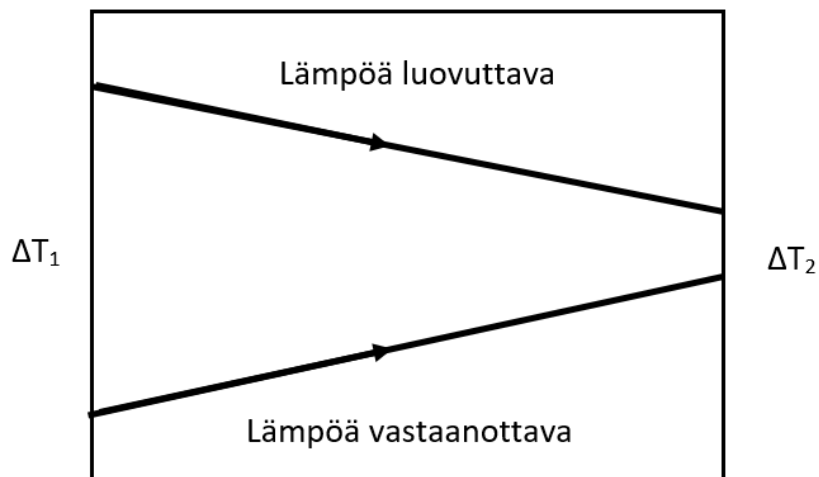
Lämmönsiirtimen toimintaperiaate voi olla vasta-, myötä- tai ristivirta. Nimitykset tulevat aineiden kulkusuunnasta lämmönsiirtimessä toisiinsa nähden. Logaritminen keskilämpötilaero toimii vasta- ja myötävirtasiirtimille (Aittomäki 2012).

Vastavirtalämmönsiirtimessä virtaukset kulkevat toisiaan vasten. Aineiden lämpötilaero pysyy prosessin ajan mahdollisimman suurena. Lämmön siirtyminen on toimintaperiaatteista tasaisinta koko prosessin ajan. Toimintaperiaatteella saavutetaan myötä- ja ristivirtasiirtimiä parempi kokonaislämmönsiirtymä. Kuvassa 16 on havainnollistettu vastavirtalämmönsiirtimen lämpötilaeroja (Aittomäki 2012).



**Kuva 16.** Vastavirtalämmönsiirtimen prosessi.

Myötävirtalämmönsiirtimissä virtaukset kulkevat samaan suuntaan. Aineiden lämpötilaero on suurimmillaan prosessin alussa ja pienimmillään prosessin lopussa. Lämpöä siirtyy alussa huomattavasti paremmin kuin lopussa. Prosessin lopussa aineiden lämpötilaero pienenee. Lämmitettävää ainetta ei ole mahdollista lämmittää kuumemmaksi kuin lämmittävän aineen loppulämpötila on. Kuvassa 17 on havainnollistettu lämpötilaeroja myötävirtalämmönsiirtimessä (Aittomäki 2012).



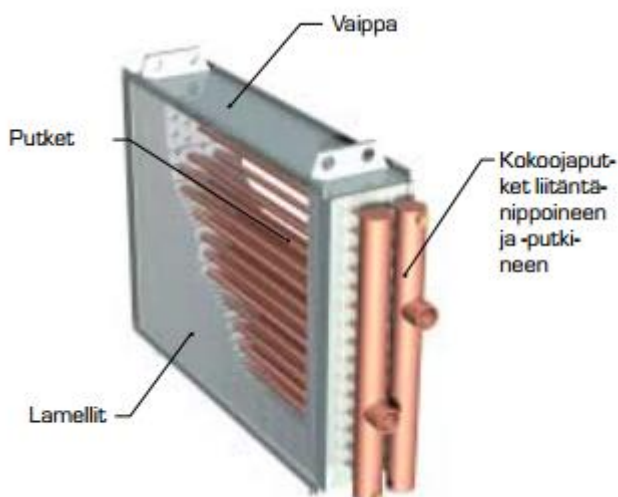
**Kuva 17.** Myötävirtalämmönsiirtimen prosessi.

Ristivirtalämmönsiirtimessä virtaukset kulkevat nimensä mukaisesti ristiin. Ristivirtalämmönsiirtimiä käytetään yleensä pienissä ilmanvaihtokoneissa niiden pienen koon vuoksi. Ristivirtalämmönsiirtimen huonoja puolia ovat lämmön epätasainen jakautuminen ja vastavirtasiirrintä huonompi lämmönsiirtymä (Aittomäki 2012).

### 5.3 Lamellilämmönsiirrin

Lamellilämmönsiirrin on yleisin lämmönsiirrin ilman jäähdytyksessä tai lämmityksessä. Lamellilämmönsiirrin on helposti muunneltavissa ja se tarvitsee vähän tilaa. Siirrin voidaan valmistaa useista eri materiaaleista, jotka lisäävät siirtimen käyttömahdollisuuksia (Aittomäki 2012).

Lamellilämmönsiirrin koostuu metallisista lamelleista, jotka on yhdistetty toisiinsa putkilla. Putkissa virtaa lämmönsiirtoneste ja lamellien tarkoituksena on lisätä lämmönsiirtopinta-alaa ilman puolella. Putkien ja lamellien lisäksi patterissa on kokoojaputket ja vaippa (Ekocoil 2015). Kokoojaputket liittävät putket toisiinsa ja vaippa toimii patterin ulkorakenteena (kuva 18).



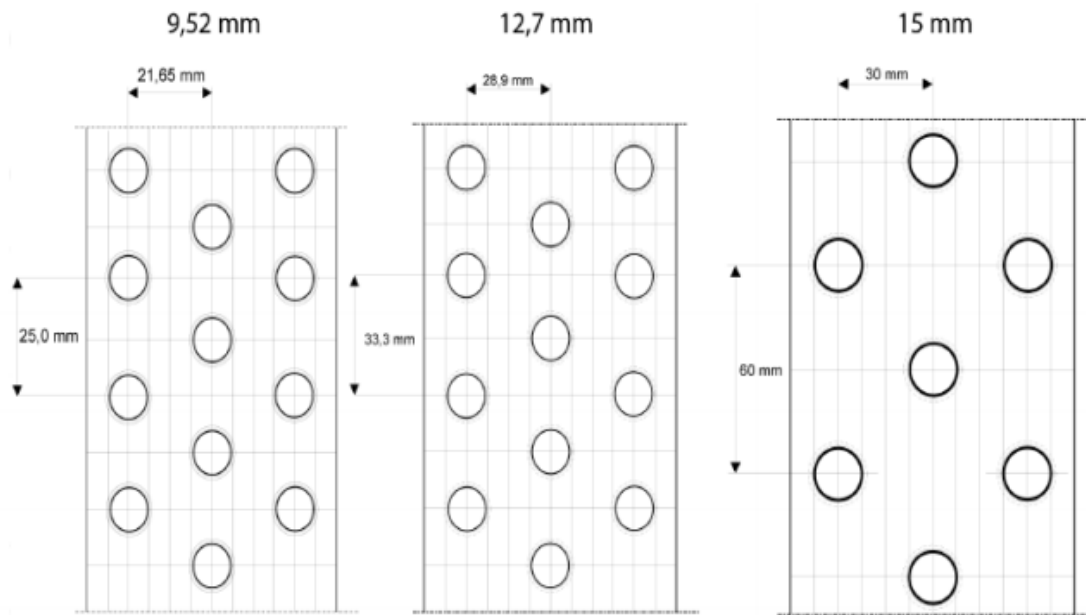
**Kuva 18.** Lamellipatterin kokoonpano (Fläktwoods 2016).

Lamellilämmönsiirtimissä lamellien liittämiseen putkiin on kaksi eri tapaa. Toisessa tavassa teräsputkista ja teräslamelleista koottu siirrin kuumasinkitään. Sinkki toimii liitosaineena putken ja lamellin välissä. Toisessa tavassa putki asetetaan lamellien sisään ja putkea laajennetaan mekaanisesti lamellikaulukseen asti. Laajennuksessa yleisimmät materiaalit ovat alumiinilamelli ja kupariputki. Molemmilla on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet ja ne ovat helposti muokattavissa. Lisäksi kupariputket ovat helposti juotettavissa kokoojaputkiin kiinni. Kuparin lisäksi materiaali voi olla tässä menetelmässä haponkestävää terästä, ruostumatonta terästä tai sähkösinkittyä terästä. Lamellien materiaali voi olla alumiini, ruostumaton teräs, haponkestävä teräs tai kupari (Aittomäki 2012).



Putket ovat sisältä sileät tai uritetut. Uritetussa putkessa virtaus pyörteilee enemmän ja lämmönsiirto pinta-ala kasvaa sileään putkeen verrattuna. Uritettu putki on aina materiaaliltaan kuparia ja kalliimpi valmistaa kuin sileä putki. Lamellit ovat poimutettuja tai tasaisia. Poimutetuissa lamelleissa ilma pyörteilee enemmän ja siirtimen pinta-ala suhteessa kokonaispituuteen on suurempi kuin tasaisissa lamelleissa (Aittomäki 2012).

Putkikokoja on tyypillisesti kolme eri kokoa. Putkien etäisyys toisistaan riippuu putkikoosta. Putkien halkaisijakoot ovat 9,52 mm, 12,7 mm ja 15 mm. Putkien etäisyydet ja siirtimen rakenne on esitetty kuvassa 19 (Ekocoil 2015).



**Kuva 19.** Tyypillisiä lamellipatterin putkikokoja ja jakoja. (Ekocoil 2015).

Lamellilämmönsiirtimissä tyypillinen lamelliväli on 2,0-2,5 mm. Lamelliväli saattaa olla myös suurempi, mikäli jäähdytettävä ilma sisältää suuria partikkeleita. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä lamellipatteri varustetaan aina tarkoitukseen sopivalla suodattimella, joten suuria partikkeleita ei pääse siirtimelle asti.

Lamellilämmönsiirtimien kehityksessä painotus on viime aikoina ollut lämmönsiirto-osan kehittämisessä ja äänitason laskemisessa. Äänitaso riippuu hyvin pitkälti käytettävästä puhaltimesta. Nykyaikaiset EC-puhaltimet ovat hyvin hiljaisia, eikä erillistä äänenvaimentajaa tarvita.

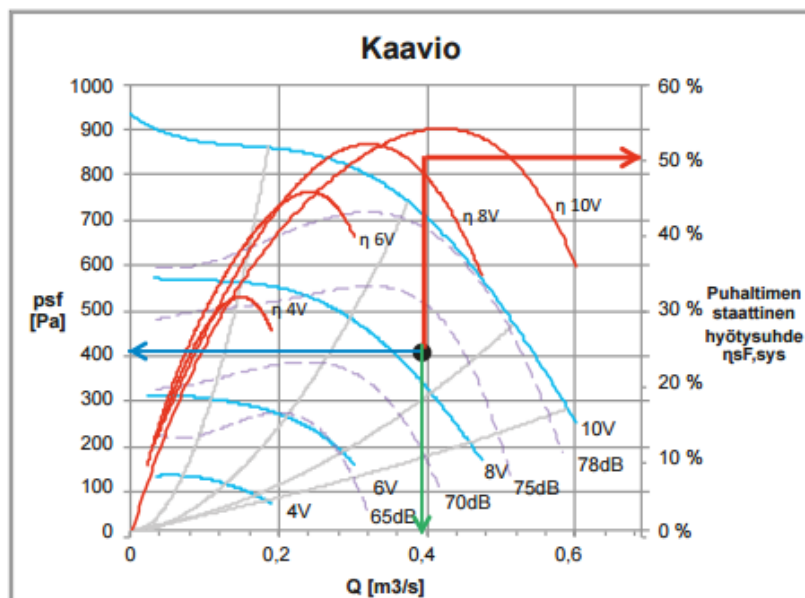
Lämmönsiirto-osan kehityksessä suuri huomio on ollut vuotoriskien vähentämisessä. Verkostossa virtaava keruuneste on ympäristömyrkky, jota ei saa päästää ympäristöön eikä viemäriin. Kelluva lämmönsiirto-osa vähentää merkittävästi vuotomahdollisuutta. Kelluvassa lämmönsiirtimessä on erityiset kannattimet lamelleille. Näin estetään putkien hankautuminen kannatuslevyihin kokonaan. Lämmönsiirrin varustetaan vuotoaltaalla

vuodon varalta. Vuotoallas kerää vuotaneen keruunesteen talteen. Vuotoaltaan tilavuuden tulee olla suurempi kuin järjestelmässä oleva keruunesteen määrä (Aittomäki 2012).

## 5.4 LTO-yksikkö

Lämmönsiirtokeräimen lisäksi LTO-yksikkö tarvitsee ilmanvaihtopuhaltimen, mahdollisesti suodattimen ja riittävän automaation toimiakseen. Vesikatolle sijoitettavia yksiköitä löytyy valmiina. Valmiin yksikön edut räätälöitävään ovat valmis suunnittelu ja asennuksen nopeus. Valmiiden yksiköiden huono puoli on sijoitettavuus aina vesikatolle. Usein kerrostalossa on olemassa poistoilmakammio, jonne räätälöitävä yksikkö voidaan sijoittaa. Sisätiloihin sijoitettu yksikkö on helpompi huollon kannalta, eikä laite ole alttiina sään vaikutuksille.

Ilmanvaihtopuhaltimen mitoitukseen tulee tietää haluttu ilmamäärä ja tarvittava paineenkorotus. Tarvittava paineenkorotus riippuu kanaviston painehäviöstä ja suodattimen painehäviöstä. Kuvassa 20 on esimerkki puhaltimen toimintakäyrästä. Kuvassa puhaltimen esimerkkitoimintapiste on merkitty mustalla pallolla. Vihreä viiva osoittaa toimintapisteessä saavutettavan tilavuusvirran. Sininen viiva osoittaa toimintapisteeseen paineenkorotuksen. Punainen viiva osoittaa toimintapisteeseen staattisen hyötysuhteen (Koja 2015).



**Kuva 20.** Puhaltimen toimintakäyrä (Koja 2015).

Nykyään perinteiset AC-moottorilla varustetut puhaltimet ovat osittain korvaantumassa EC-puhaltimilla. EC-puhaltimet on varustettu harjattomalla tasavirtamoottorilla. Tekniikka mahdollistaa perinteistä AC-moottoria paremman hyötysuhteen ja sisäisen elektroniikan avulla puhaltimien pyörimisnopeuden säätö onnistuu ilman erillistä taajuus-

muuntajaa. Pyörimisnopeutta voidaan säätää talotekniikan jänniteviestillä. EC-puhaltimien hyötysuhdekäyrä on huomattavasti tasaisempi kuin AC-puhaltimien. AC-puhaltimien hyötysuhde laskee jyrkästi parhaan toimialueen ulkopuolella (Ebm-papst 2008).

Järjestelmään soveltuva puhallintyyppi on hyrräpuhallin. Hyrräpuhallin tunnetaan myös nimellä keskipakopuhallin. Hyrräpuhalltimessa ilma tulee puhaltimeen keskeltä ja poistuu sivuille. Hyrräpuhallin voidaan sijoittaa rakennuksen ulospuhalluspiipun päälle tai sisälle erilliseen kammioon. Kuvassa 21 on esitetty erään valmistajan hyrräpuhallin EC-moottorilla.



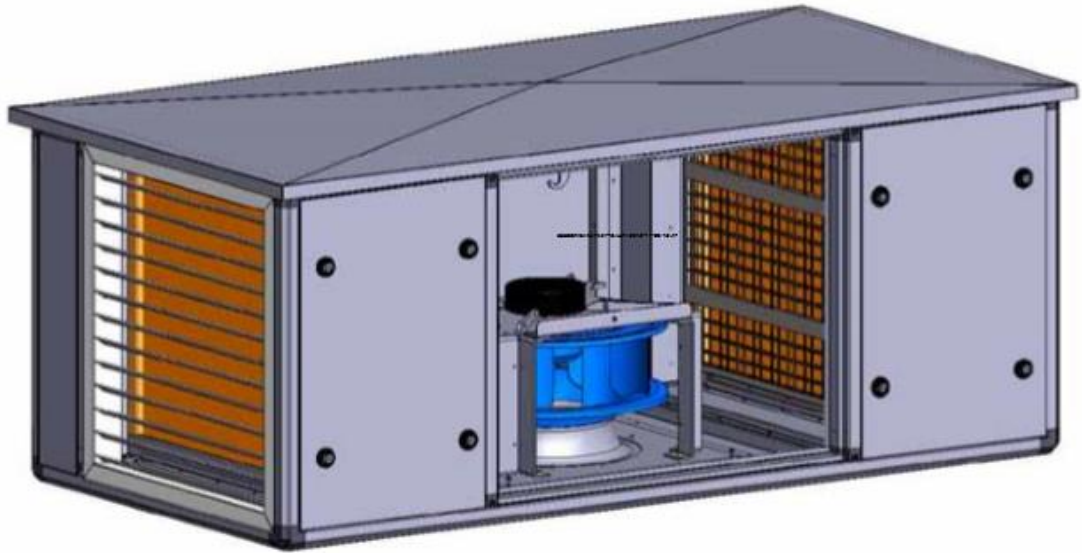
*Kuva 21. Hyrräpuhallin (Ziehl-abegg 2015).*

Lämmöntalteenottopatteri varustetaan ilmansuodattimilla likaantumisen estämiseksi. Pöly aiheuttaisi patterin lämpöä siirtäville pinnoille eristekerroksen, joka heikentää lämmönsiirtokykyä. Pöly kasvattaa patterin painehäviötä ja saattaa jopa tukkia patterin osittain tai kokonaan.

Poistoilmapatterin suodattimen suodatusluokaksi suositellaan luokkaa F7. F7-suodatusluokan suodatin sitoo itseensä 80 % yli 0,4 mikrometrin partikkeleista (Camfil 2013). Suodatin asennetaan yksikköön ensimmäiseksi komponentiksi ennen poistoilmapatteria ja ilmanvaihtopuhallinta.

Ilmanvaihtopuhaltimen ohjaus voidaan toteuttaa talotekniikan yksikkösäätimellä. Yksikkösäädin säätää poistoilmapuhallinta tarpeen mukaan. Suodatin varustetaan paine-erolähtettimeillä, jolta yksikkösäädin saa tiedon suodattimen painehäviöstä. Painehäviön ollessa riittävän suuri yksikkö ilmoittaa suodattimen vaihtotarpeesta. Suodatinta ennen asennetaan paineanturi ilmamäärän säätöön. Paineohjauksella varmistetaan tasainen ilmavirta. Lisäksi paineohjaukselta saadaan tieto ilmanvaihdon häiriöistä. Yksikkösäädin liitetään talotekniikan väylän avulla lämmityskeskuksen säätimeen. Väyläteknikka mahdollistaa ilmanvaihtopuhaltimen etäkäytön ja valvonnan.

Valmiissa LTO-yksiköissä on keruupatteri ja puhallin valmiiksi koottuina. Valmistajalta löytyy mitoitusaulukot ja asennusohjeet yksiköitä varten. Yleisesti ottaen valmiisiin yksiköihin täytyy ainoastaan lisätä tarvittavat anturit ja säädinlaitteet. Kuvassa 22 on Kojan Hilto EC-36. Laitteen huoltoluukku on auki.



*Kuva 22. Hilto EC-36 (Koja 2015).*

Hilto LTO-yksikkö on varustettu koosta riippuen yhdellä tai kahdella lamellipatterilla ja suodattimilla. Yksikköön kuuluu Ziehl-Abeggin EC -hyrräpuhallin. Patterit on varustettu kondenssivesialtailla. Yksikköä on kolmea eri kokoa. Ilman tilavuusvirta voi suurimmillaan olla  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  ja lämmönsiirtimen teho  $100 \text{ kW}$ . Järjestelmän paino on välillä  $350\text{-}790 \text{ kg}$ . Järjestelmä asennetaan aina vesikatolle. Asennuksessa on otettava huomioon katon kantavuus suuresta massasta johtuen. Jäteilman puhalluksen osalta yksikkö täyttää rakentamismääräyskokoelman vaatimukset (Koja 2015).

Retermian LTO-huippuimuriyksikkö on varustettu yhdellä yksi- tai kaksikerroksisella harjapatterilla (kuva 23). Harjapattereiden kanssa ei käytetä suodattimia. Katolle sijoitettu keruuyksikkö on tarkoitettu puhdistaa painepesurilla vuosihuoltojen yhteydessä. Yksikkö on varustettu yhdellä tai useammalla EC –puhaltimella. Ilman tilavuusvirta voi suurimmilla olla  $4 \text{ m}^3/\text{s}$  (Retermia 2014).

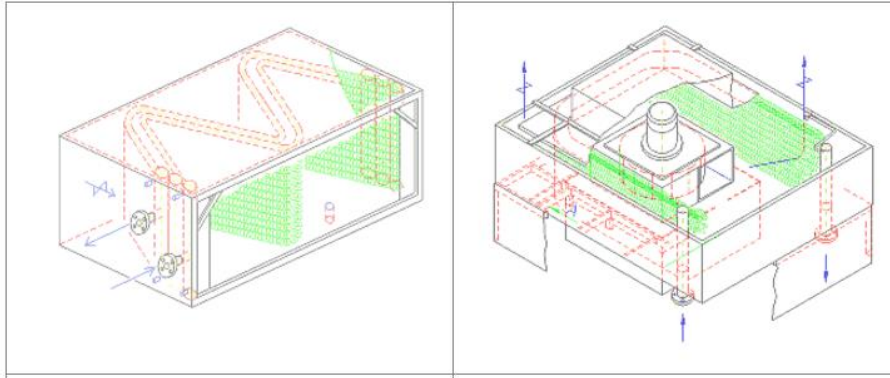


**Kuva 23.** Retermian lämmöntalteenottoyksikkö (Retermia 2014).

Retermian lämmöntalteenottoyksiköissä käytetään lamellilämmönsiirtimien sijasta neulalämmönsiirintä. Neulalämmönsiirrin koostuu putkesta, jonka ulkopinta on täynnä metallisia, neulamaisia lankoja. Langat parantavat huomattavasti siirtimen lämmönsiirtoominaisuuksia.

Neulalämmönsiirtimiä on saatavilla useita eri tyyppiä. Yleisesti neulalämmönsiirtimet voidaan jakaa kahteen eri päätyyppiin aaltomalliseen ja U-malliseen. Nimitykset tulevat

lämmönsiirtimen muotoilusta. Aaltomallisia lämmönsiirtimiä käytetään tuloilman esilämmityksessä, tuloilman lämmityspatterina ja poistoilman keruupatterina. U-mallista lämmönsiirintä käytetään pääsääntöisesti koneellisissa poistoilmanvaihtojärjestelmissä ja koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmässä erillispoistojen lämmöntalteenotossa. Kuvassa 24 on esitetty aaltomallinen ja U-mallinen lämmönsiirrin. Neulalämmönsiirrintekniikka on patentoitu Retermia Oy:lle (Retermia 2014).



**Kuva 24.** Vasemmalla aaltomallinen ja oikealla U-mallinen lämmönsiirrin (Retermia 2014).

Joissain rakennuksissa lämmöntalteenoton keruuyksikön asennus vesikatolla voi olla mahdoton toteuttaa. Syitä tähän voivat olla arkkitehtoninen suojelu, liian jyrkkä katto, liian alhainen katon kantokyky tai huollon vaikeus. Näissä tapauksissa lämmöntalteenottoyksikkö kannattaa sijoittaa sisätiloihin erilliseen poistoilmakammioon.

Retermian MINEX-IN-E poistoilmakone on suunniteltu poistoilmakammioon asennettavaksi. Koneessa on neulapatteri, äänenvaimennin ja yksi tai kaksi ilmanvaihtopuhallinta. Toimiakseen kone vaatii viemäröintipisteen kondenssivedelle ja neulapatterin pesuvehdelle. Kuvassa 25 on esitetty MINEX-IN-E poistoilmakone (Retermia 2014).



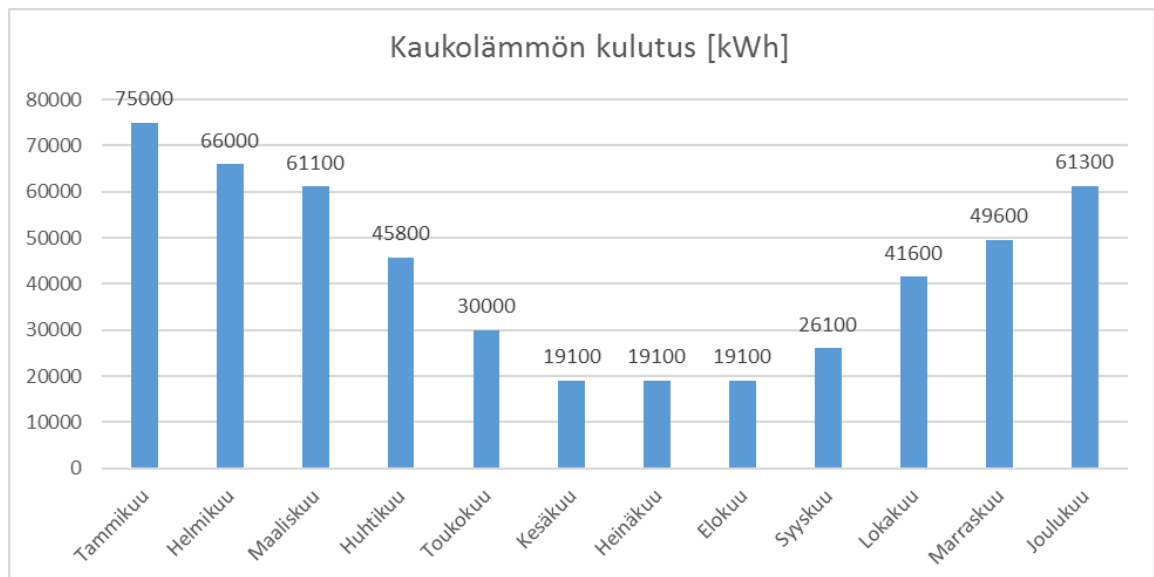
**Kuva 25.** MINEX-IN-E poistoilmakone (Retermia 2014).

## 6. TALOUDELLINEN KANNATTAVUUS

Tässä työssä tarkastellaan poistoilmalämpöpumpun soveltuvuutta taloudellisesti Asunto Oy Itäviittaa. Asunto Oy Itäviitta sijaitsee Turussa. Yhtiössä on kaksi kerrostaloa ja 60 asuntoa.

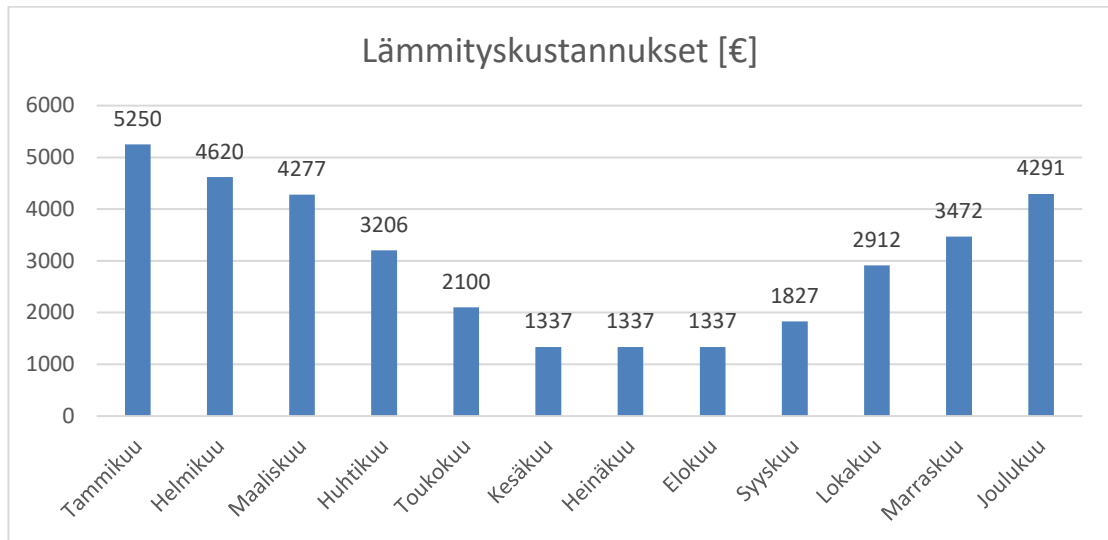
### 6.1 Energian kulutus

Asunto Oy Itäviitasta saatiin diplomityötä varten kaukolämmön kulutustiedot vuosilta 2010- 2015. Kulutustiedoista laskettiin keskimääräinen kuukausikohtainen kulutus (kuva 26).



*Kuva 26. Kaukolämmön kuukausikohtainen kulutus.*

Euroiksi muutettuna lämmityskustannukset on esitetty kuvassa 27. Kaukolämmön hinta on 70 €/MWh. Siirtomaksua ei oteta huomioon. Kokonaiskustannukset kaukolämmön kulutuksessa yhtiössä ovat 35 966 €/vuodessa.



**Kuva 27.** Lämmityskustannukset kaukolämmöllä.

Kaukolämpöä käytetään yhtiössä tilojen lämmittämiseen ja lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Lämpimän käyttöveden energian tarve on vakio kuukaudesta riippumatta. Kiinteistön lämmittämiseen tarvittavan energian määrä vaihtelee suuresti kuukaudesta riippuen. Lämpimän käyttöveden tuottamiseen kuluvaa energiaa voidaan arvioida kesä heinä- ja elokuun kaukolämmön kulutuksesta. Lähtökohtaisesti näinä kuukausina ei tarvita energiaa tilojen lämmittämiseen. Taulukossa 2 on eritelty tilojen lämmitys ja käyttöveden lämmitys toisistaan.

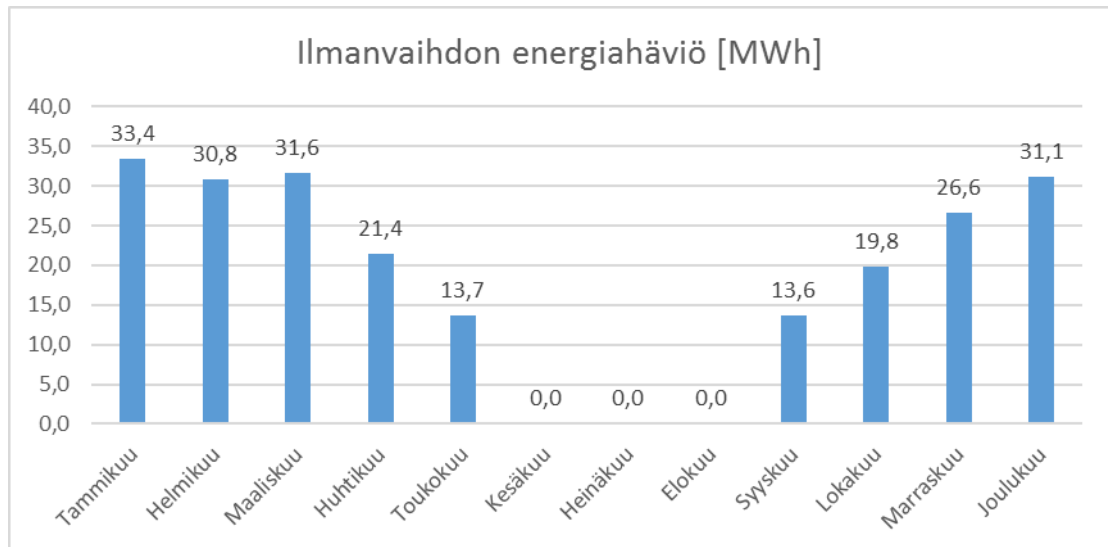
**Taulukko 2.** Kaukolämmön kulutuksen erittely.

Kuukausi	Käyttövesi [MWh]	Lämmitys [MWh]
Tammikuu	19,1	50,9
Helmikuu	19,1	42,1
Maaliskuu	19,1	37,6
Huhtikuu	19,1	24,9
Toukokuu	19,1	10,9
Kesäkuu	19,1	0,0
Heinäkuu	19,1	0,0
Elokuu	19,1	0,0
Syyskuu	19,1	7,0
Lokakuu	19,1	21,1
Marraskuu	19,1	27,4
Joulukuu	19,1	38,0

Yhtiön ilmanvaihto on toteutettu poistoilmanvaihtojärjestelmänä. Ilmanvaihtoa ajetaan kahdella nopeudella vuorokausikellon mukaan. Tehostusilmamäärä yhtiössä on 2,4 m<sup>3</sup>/s

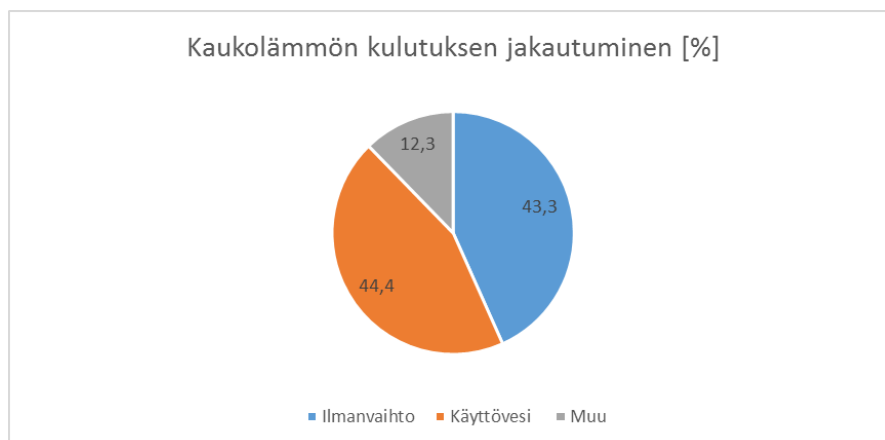


ja se on päällä kuusi tuntia vuorokaudessa. Muutoin ilmamäärä tiputetaan puoleen. Ilmanvaihdon aiheuttamaa energiahäviötä voidaan arvioida kaavan 2 avulla kuukausikoh-  
taisesti korvausilman lämmittämiseen kuluvan energian mukaan (kuva 28).



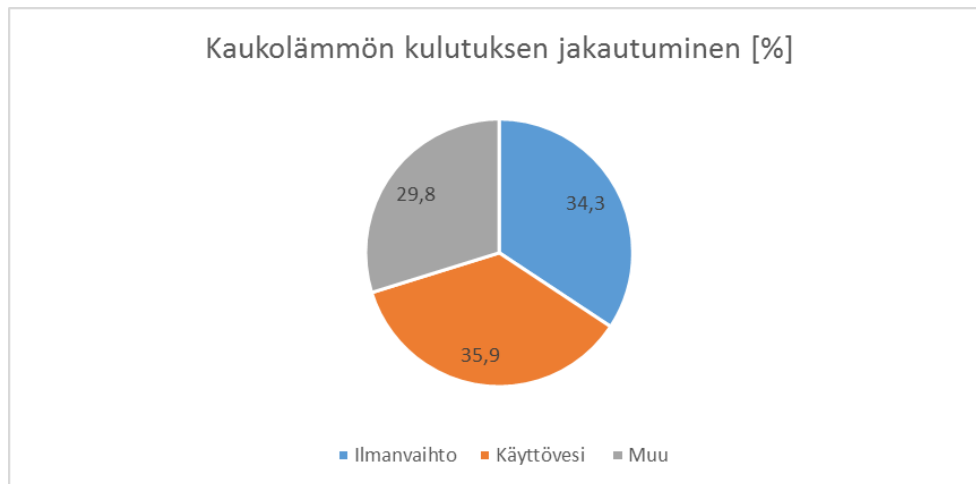
**Kuva 28.** Ilmanvaihdon energiahäviö.

Energiahäviöiden tarkastelussa katsotaan kaukolämmön energian jakaantumista käyttöveden lämmittämisen, ilmanvaihdon lämpöhäviöiden ja muiden lämpöhäviöiden kanssa. Kerrostalon lämpötaseessa noin 30 % rakennukseen tulevasta lämmitysenergiasta on peräisin muualta kuin kaukolämmöstä. Tämän energian määrään ei voida vaikuttaa ja sen määrä pysyy vakiona. Voidaan olettaa, että ilmanvaihdon säädöllä saavutettu säästö vaikuttaa suoraan kaukolämmön kulutukseen. Kuvassa 29 on esitetty Asunto Oy Itäviitan kaukolämmön energian jakautuminen. Kuvaajassa ei ole huomioitu muita lämmönlähteitä kuin kaukolämpö. Tästä syystä ilmanvaihdon ja käyttöveden osuus on suhteellisen suuri. Mikäli muut lämmönlähteet otettaisiin huomioon, kasvaisi kohdan ”muut” osuus huomattavasti.



**Kuva 29.** Kaukolämmön kulutuksen jakautuminen.

Kaukolämmön osuus kiinteistön lämmityksestä on tyypillisesti noin 70 % vuotuisesta kokonaislämmöntarpeesta. Huomioitaessa muu lämmitysenergia, on Itäviitan energiantarve 733 MWh/vuosi. Kokonaislämmitysenergian jakaantuminen on esitetty kuvassa 30. Käyttöveden ja ilmanvaihdon lämmitysenergiat pysyivät vakioina ja kohdan ”muu” osuus kasvaa huomattavasti.



**Kuva 30.** Kokonaisenergian kulutuksen jakautuminen.

## 6.2 Järjestelmän toteutusperiaatteet

Tässä diplomityössä tutkitaan lämpöpumpputermostuksen toteutusta kolmella eri tavalla. Järjestelmä koostuu samoista komponenteista, ainoastaan poistoilmavirran määrää ohjataan eri periaatteella.

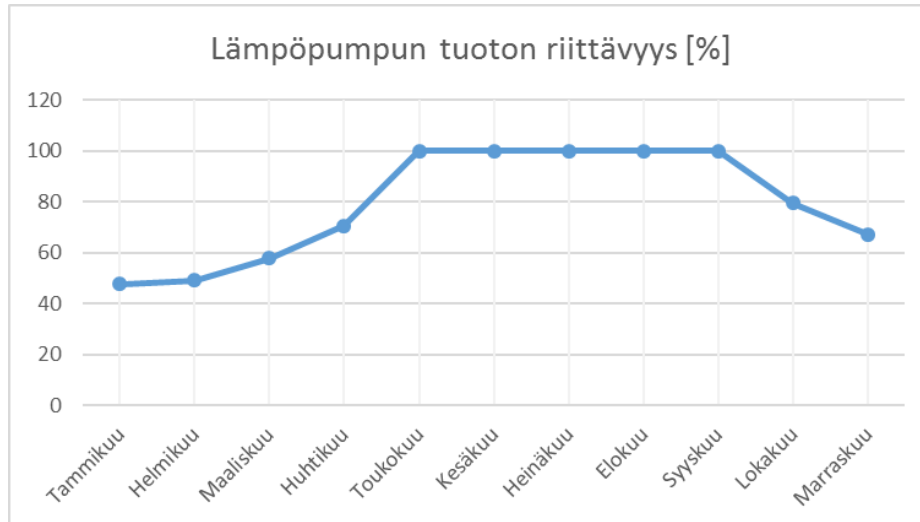
Pidettäessä ilmanvaihto kaksinopeuksisena perinteisen tavan mukaan, pysyy yhtiön lämmitysenergian tarve samana kuin ilman lämpöpumpputermostusta. Lämpöpumpun hyödynnettävissä oleva energia riippuu sisäilman lämpötilasta, lämmönsiirtimen jälkeisestä ilman lämpötilasta ja ilman keskimääräisestä massavirrasta. Sisäilman lämpötila on +21 astetta ja ulospuhallettavan ilman lämpötila +2 astetta. Taulukossa 3 on esitetty kuukausikohtaisesti lämpöpumpun hyödynnettävissä oleva energia, lämpöpumpun lämpökerroin ja lämpöpumpun suurin mahdollinen tuotto kuukaudessa. Laskennassa on käytetty kaavoja 1, 2 ja 3.

**Taulukko 3.** Lämpöpumpun kuukausikohtainen tuotto perustilanteessa.

Kuukausi	Hyödynnettävä energia [MWh]	COP	Tuotto [MWh]
Tammikuu	25,4	3,47	35,7
Helmikuu	23,0	3,43	32,4
Maaliskuu	25,4	3,58	35,3
Huhtikuu	24,6	4,16	32,4
Toukokuu	25,4	3,76	31,9
Kesäkuu	24,6	2,58	40,2
Heinäkuu	25,4	2,58	41,5
Elokuu	25,4	2,58	41,5
Syyskuu	24,6	3,76	31,3
Lokakuu	25,4	4,30	33,1
Marraskuu	24,6	3,83	33,3
Joulukuu	25,4	3,61	35,2

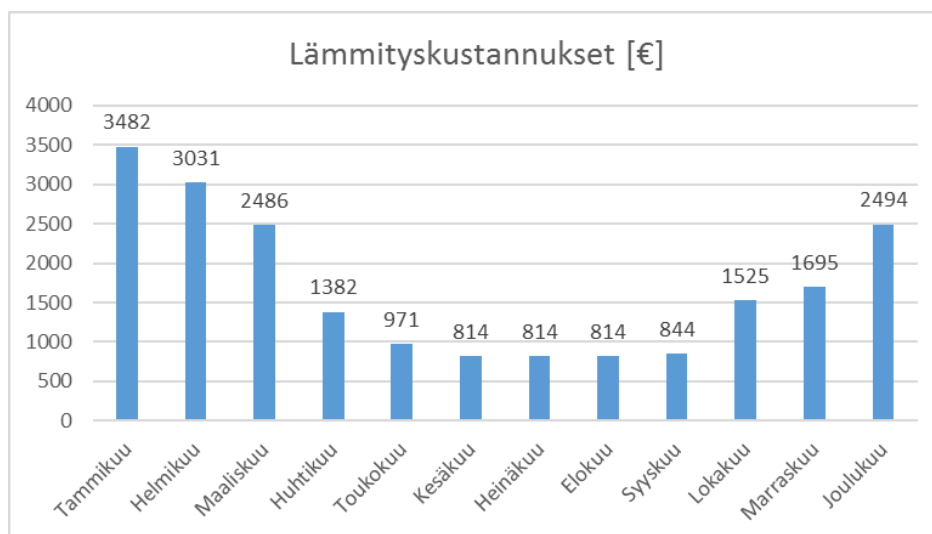
Lämpökerroin COP riippuu lämmityskohteen halutusta lämpötilasta. Kuukausikohtainen COP on määritelty patteriverkoston keskimääräisellä lämpötilalla keskimääräisen ulkoilman lämpötilan mukaan. Lämmityskauden ulkopuolisina kuukausi lämpöpumppu tuottaa ainoastaan lämmintä käyttövettä. Tästä johtuen COP on kaikkein pienin kesä-, heinä- ja elokuussa.

Lämpöpumpun tuottamaa energiaa voidaan varastoida hetkellisesti. Yleisin varastoimis- menetelmä on lämminvesivaraaja, jonne energiaa kerätään kulutuspiikkejä varten. Varaajat toimivat hyvin lämpimän käyttöveden kanssa. Varaajaan ei kuitenkaan voida varastoida suuria määriä energiaa pitkäksi aikaa taloudellisesti. Tästä johtuen kesäkuukausina syntyvää ylijäämäenergiaa ei voida varastoida talven varalle. Lämpöpumpun tuoton riittävyys kaukolämmön kulutuksen suhteen on esitetty kuukausikohtaisesti kuvassa 31.



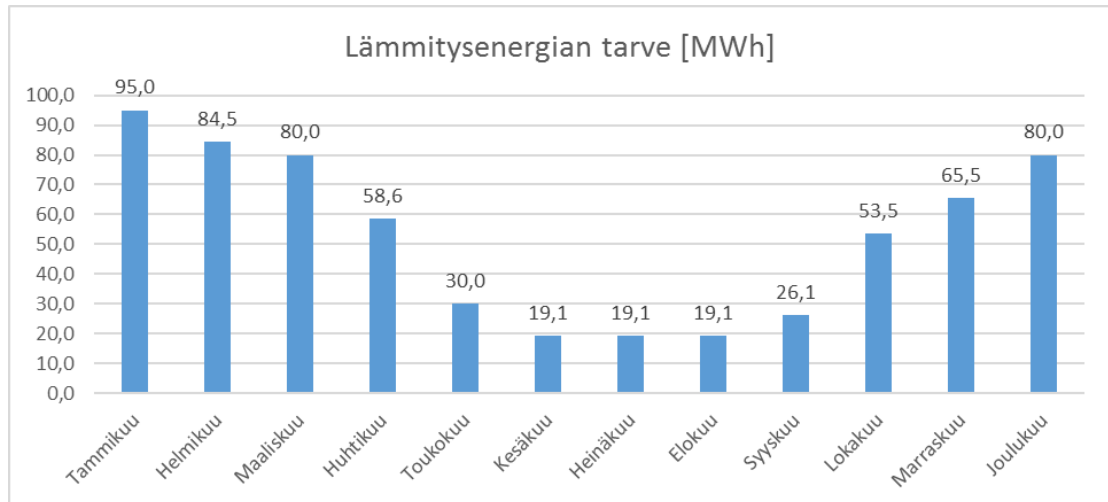
**Kuva 31.** Lämpöpumpun tuoton riittävyys perustilanteessa.

Arvioitaessa poistoilmalämpöpumpun taloudellista kannattavuutta on suuressa osassa sähkön ja kaukolämmön hinta. Sähkön hinta tässä diplomityössä on 110 €/MWh ja kaukolämmön 70 €/MWh. Laskenta toteutetaan kuukausikohtaisesti laskemalla molempien lämmönlähteiden energian kulutus ja kustannukset. Vuotuinen kustannus saadaan laske- malla kuukausikohtaiset kustannukset yhteen. Kuvassa 32 on esitetty kuukausikohtaiset kustannukset lämpöpumpujärjestelmälle. Kokonaislämmityskustannukset ovat 20 096 € vuodessa.



**Kuva 32.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset perustilanteessa.

Yksi yleisimpiä tapoja rakentaa järjestelmä nykyään on, että nostetaan ilmamäärä tehoksukselle koko ajaksi. Näin saadaan nostettua lämpöpumpun tuottoa ja ilman laatu paranee asuinhuoneistoissa. Samalla kuitenkin vedon tunne lisääntyy ja lämmitysenergian tarve kasvaa. Kuvassa 33 on esitetty energiantarve ilmanvaihdon ollessa jatkuvasti tehostuksella.



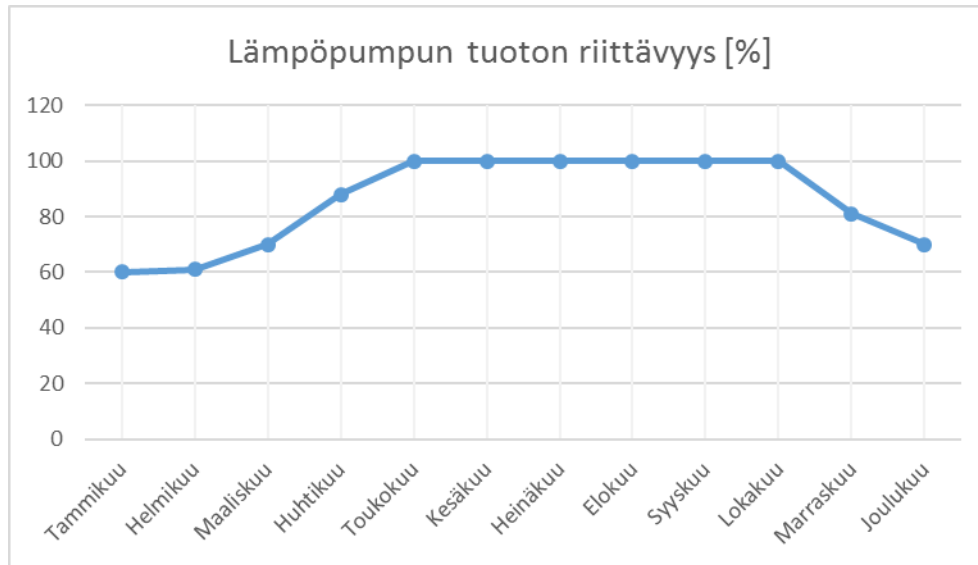
**Kuva 33.** Kuukausikohtainen lämmitysenergian tarve tehostetulla ilmanvaihdolla.

Pidettäessä ilmvirtaa jatkuvasti tehostuksella kasvaa lämpöpumpun tuotto suhteessa kaksinopeuksiseen ilmanvaihtoon. Ilman keskimääräinen massavirta kasvaa huomattavasti vuorokaudessa. Taulukossa 4 on esitetty kuukausikohtaisesti lämpöpumpun hyödynnettävissä oleva energia, lämpöpumpun lämpökerroin ja lämpöpumpun suurin mahdollinen tuotto kuukaudessa.

**Taulukko 4.** Lämpöpumpun kuukausikohtainen tuotto tehostetulla ilmanvaihdolla.

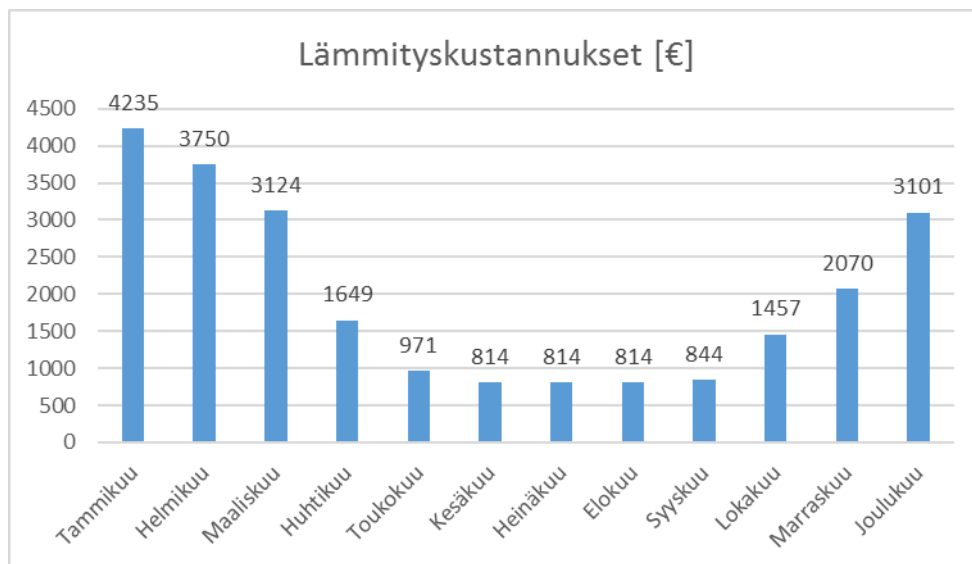
Kuukausi	Hyödynnettävä energia [MWh]	COP	Tuotto [MWh]
Tammikuu	40,7	3,47	57,2
Helmikuu	35,7	3,43	51,9
Maaliskuu	40,7	3,58	56,5
Huhtikuu	39,4	4,16	51,9
Toukokuu	40,7	3,40	57,7
Kesäkuu	39,4	2,58	64,3
Heinäkuu	40,7	2,58	66,5
Elokuu	40,7	2,58	66,5
Syyskuu	39,4	3,40	55,8
Lokakuu	40,7	4,30	53,0
Marraskuu	39,4	3,83	53,3
Joulukuu	40,7	3,61	56,3

Lämpöpumpun tuoton kasvaessa kaukolämmön tarve pienenee. Lämpöpumpun tuoton riittävyys suhteessa kaukolämmön kulutukseen on esitetty kuvassa 34.



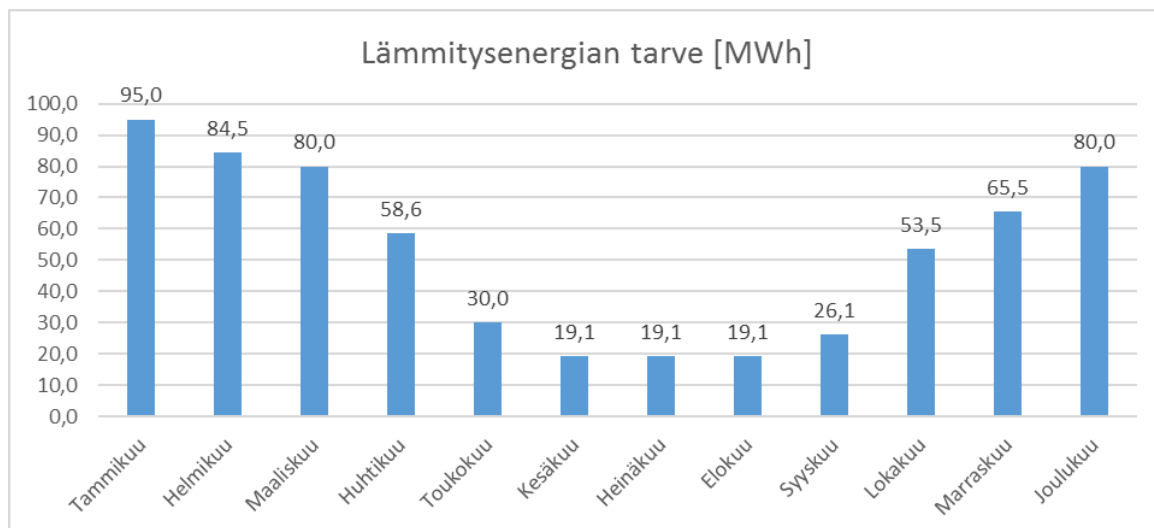
**Kuva 34.** Lämpöpumpun tuoton riittävyys tehostetulla ilmanvaihdolla.

Vuotuiset kustannukset järjestelmän tuottamalle energialle saadaan laskemalla kuukausikohtaisesti kaukolämmön kustannukset ja lämpöpumpun kustannukset. Kuvassa 35 on esitetty kustannukset kuukausikohtaisesti. Vuoden kokonaiskustannukset ovat 23 645 € vuodessa.



**Kuva 35.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset tehostetulla ilmanvaihdolla.

Uudessa mallissa ilmanvaihto pidetään kaksinopeuksisena, mutta tehostusilmavirran määrää ohjataan ulkoilman lämpötilan mukaan. Ilman keskimääräisen massavirran las-  
kiessa pienenee myös lämmitysenergian tarve. Lisäksi vedon tunne asunnoissa vähenee. Haittapuolena on lämpöpumpun pienempi tuotto. Kuvassa 36 on esitetty kyseisen järjes-  
telmän lämmitysenergian tarve kuukausittain.



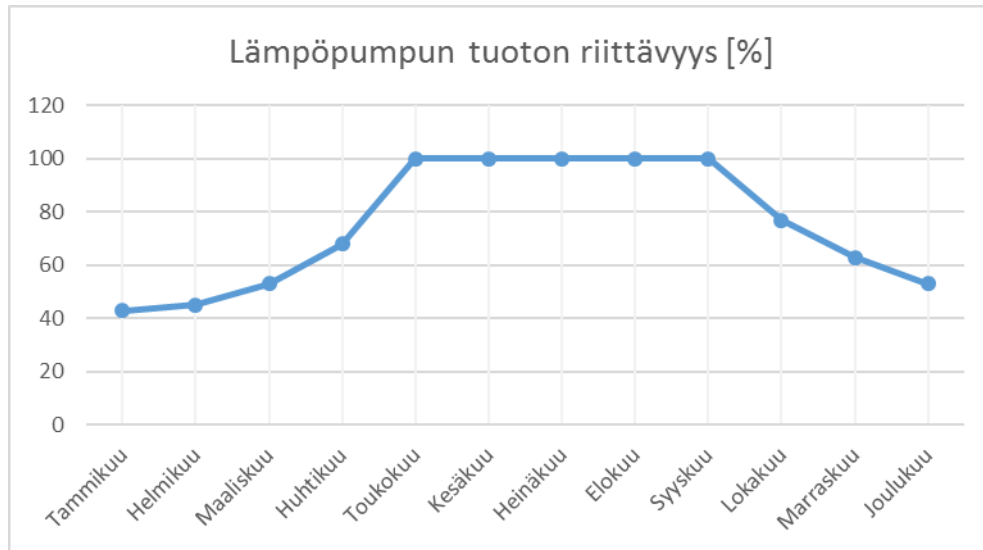
**Kuva 36.** Lämmitysenergian tarve kuukausittain ulkoilman lämpötilan mukaan ohjatulla ilmanvaihdolla.

Lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian määrä vaihtelee huomattavasti. Laskenta toteutetaan kuukausikohtaisesti. Kuukauden keskimääräinen tehostusilmavirta määritellään keskimääräisen ulkoilman lämpötilan mukaan. Taulukossa 5 on esitetty kuukausikohtaisesti lämpöpumpun hyödynnettävissä oleva energia, lämpöpumpun lämpökerroin ja lämpöpumpun suurin mahdollinen tuotto kuukaudessa.

**Taulukko 5.** Kuukausikohtainen lämpöpumpun hyödynnettävä energia ja tuotto ulkoilman lämpötilan mukaan ohjatulla ilmanvaihdolla.

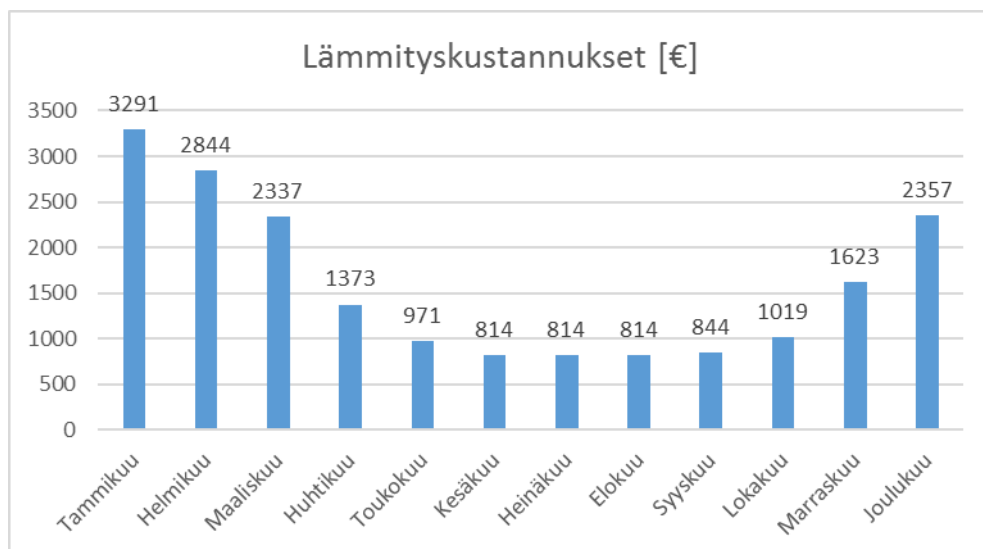
Kuukausi	Hyödynnettävä energia [MWh]	COP	Tuotto [MWh]
Tammikuu	21,6	3,47	30,3
Helmikuu	19,4	3,43	27,4
Maaliskuu	21,9	3,58	30,3
Huhtikuu	22,6	4,16	29,7
Toukokuu	25,4	3,4	31,9
Kesäkuu	24,6	2,58	40,2
Heinäkuu	25,4	2,58	42,5
Elokuu	25,4	2,58	42,5
Syyskuu	24,6	3,4	31,4
Lokakuu	23,7	4,3	30,9
Marraskuu	21,8	3,83	29,5
Joulukuu	22	3,61	30,4

Lämpöpumpun tuoton laskiessa kasvaa kaukolämmön tarve. Lämpöpumpun tuoton riittävyys suhteessa kaukolämmön kulutukseen on esitetty kuvassa 37.



**Kuva 37.** Lämpöpumpun tuoton riittävyys ulkoilman lämpötilan mukaan ohjatulla ilmanvaihdolla.

Vuotuiset kustannukset järjestelmän tuottamalle energialle saadaan laskemalla kuukausikohtaisesti kaukolämmön kustannukset ja lämpöpumpun kustannukset. Kuvassa 38 on esitetty kustannukset kuukausikohtaisesti. Vuoden kokonaiskustannukset ovat 19 100 € vuodessa.



**Kuva 38.** Kuukausittaiset lämmityskustannukset ulkoilman lämpötilan mukaan ohjatulla ilmanvaihdolla.



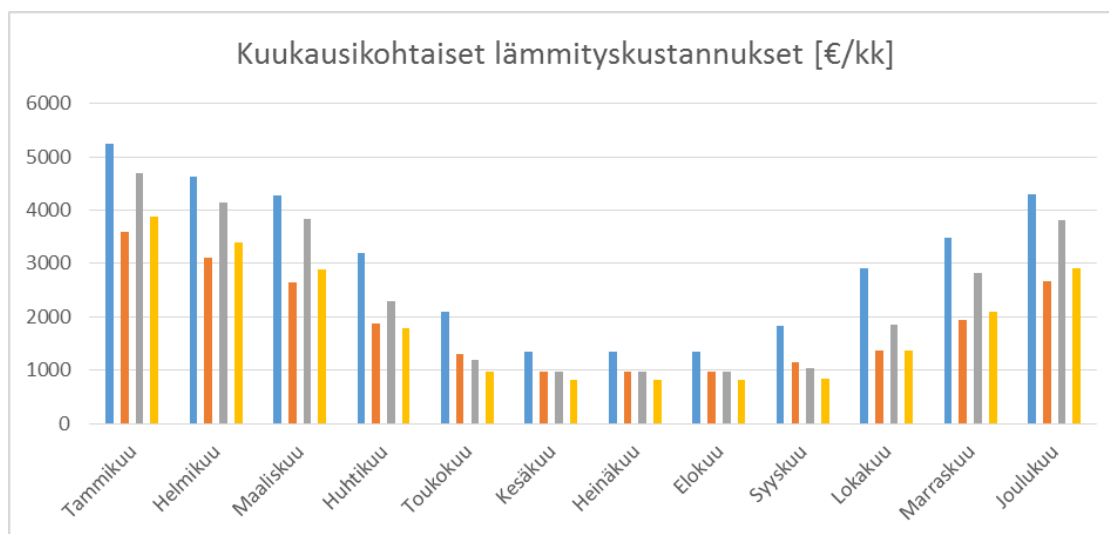
### 6.3 Eri toteutusperiaatteiden vertailu

Toteutusperiaatteiden arviointi tehdään vertaamalla vuosittaisia lämmityskustannuksia toisiinsa. Lämpöpumpun keskimääräinen teho vaihtelee suuresti eri toteutusperiaatteiden välillä. Samoin vaihtelee myös energian tarve ja kaukolämmön kulutus. Taulukossa 6 on esitetty eri toteutusperiaatteiden kokonaiskustannukset.

**Taulukko 6.** Vuosikustannusten vertailu.

Järjestelmä	Kustannukset [€/vuosi]	Ero alkuperäiseen [€]
Alkuperäinen	35 966	0
Perinteinen	20 096	15 870
Tehostus	23 645	12 321
Lämpötilaohjaus	19 100	16 866

Tuloksista voidaan todeta, että suurin vuotuinen säästö lämmityskustannuksissa saavutetaan uudella lämpötilaohjaus-järjestelmällä. Kuukausikohtaisessa tarkastelussa huomataan lämpötilaohjauksen olevan edullisin vaihtoehto jokaisen kuukautena. Kesäkuukausina ilmanvaihdon ohjausmenetelmällä ei ole merkitystä, sillä korvausilman lämmittämiselle ei ole tarvetta. Kuvassa 39 on havainnollistettu lämmityskustannusten kertymää kuukausittain.



**Kuva 39.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset. Sininen palkki on alkuperäiset kustannukset ilman lämmöntalteenottoa, punainen palkki on lämmöntalteenotto lämpötilaohjauksella, violetti palkki on lämmöntalteenotto tehostuksella ja keltainen palkki on lämmöntalteenotto perinteisellä ohjauksella.

Vuotuiset erot eri järjestelmien välillä syntyvät pääosin marraskuun ja maaliskuun välillä. Erot johtuvat korvausilman lämmittämiseen menevän energian vaihtelusta. Suurin säästö saavutetaan pienimmällä ilmanvaihdolla. Taulukossa 7 on esitetty kuvan 39 kuukausikohtaiset arvot.

**Taulukko 7.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset [€].

	Alkuperäinen	Perinteinen	Tehostus	Lämpötilaohjaus
Tammikuu	5250	3482	4235	3291
Helmikuu	4620	3031	3750	2844
Maaliskuu	4277	2486	3124	2337
Huhtikuu	3206	1382	1649	1373
Toukokuu	2100	971	971	971
Kesäkuu	1337	814	814	814
Heinäkuu	1337	814	814	814
Elokuu	1337	814	814	814
Syyskuu	1827	844	844	844
Lokakuu	2912	1525	1457	1019
Marraskuu	3472	1695	2070	1623
Joulukuu	4291	2494	3101	2357

Laskennassa lämpöpumppujen arvioitiin tuottavan mahdollisimman paljon energiaa. Todellisuudessa lämpöpumpun toimintaan tulee katkoksia. Käyttökatkokset voivat johtua järjestelmän käyntihäiriöstä, huolloista tai lämmöntarpeen odotettua pienemmästä tarpeesta. Lämpimän käyttöveden kohdalla hetkittäinen kulutus voi olla liian suurta lämpöpumpun tuotolle. Käyttökatkosten aikana kiinteistön lämmöntuotto toteutuu kaukolämmön avulla.

Kuukausikohtaisella lämpöpumpun tuottokertoimella voidaan saada säästölaskelmasta huomattavasti todenmukaisempi. Tuottokerroin on aina pienempi kuin yksi. Tuottokertoimella kerrotaan lämpöpumpun kuukausikohtainen tuotto ja tulosta voidaan pitää hyvänä arviona todellisesta tuotosta. Tuottokertoimet perustuvat tässä vaiheessa arvioon ja kokemusperäisten tuottokertoimien määrittäminen onnistuu vasta muutaman vuoden kulluttua. Arvioidut kuukausikohtaiset tuottokertoimet on esitetty taulukossa 8.

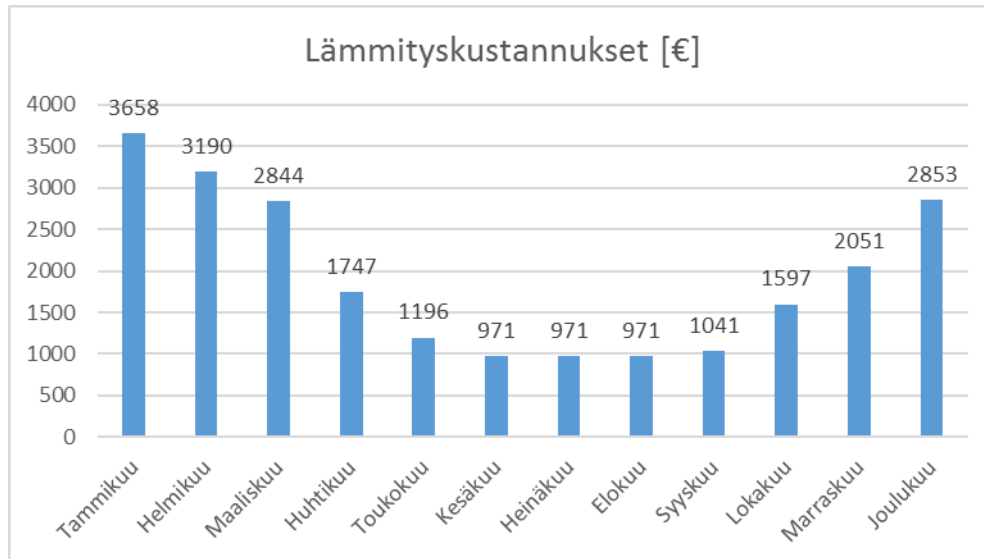
**Taulukko 8.** Arvioidut kuukausikohtaiset lämpöpumpun tuottokerroimet.

Kuukausi	Tuottokerroin
Tammikuu	0,9
Helmikuu	0,9
Maaliskuu	0,8
Huhtikuu	0,8
Toukokuu	0,8
Kesäkuu	0,7
Heinäkuu	0,7
Elokuu	0,7
Syyskuu	0,8
Lokakuu	0,8
Marraskuu	0,8
Joulukuu	0,8

Lämmöntarve on suurin tammi- ja helmikuussa. Tästä johtuen voidaan olettaa myös lämpöpumpun käyntitarpeen olevan suuri. Lämmitystarpeen pienentyessä lisääntyvät lämpöpumpun seisonta-ajat. Kesäkuukausi lämpöpumppu tuottaa ainoastaan lämmintä käyttövettä ja arvion mukaan lämpöpumppu pystyy riittävän suuren varaajan avulla tuottamaan 70 % lämpimän käyttöveden tarpeesta.

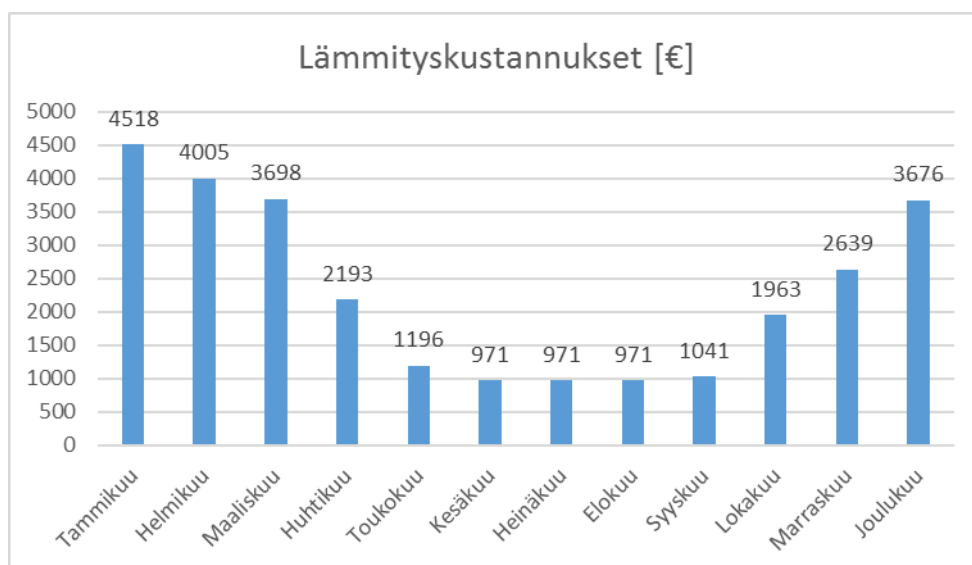
Tuottokerroin vaikuttaa jokaiseen järjestelmään eri tavalla. Energian tarve pysyy samana kuin edeltävissä vertailuissa, mutta kaukolämmön osuus energiantuotosta kasvaa. Kaukolämmön osuuden suureneminen kasvattaa kiinteistön vuosittaisia lämmityskustannuksia.

Pidettäessä ilmanvaihto kaksinopeuksisena perinteisen tavan mukaan ovat vuotuiset lämmityskustannukset tarkasteltavassa yhtiössä 23 091 €. Lämpöpumpun tuottokertoimen käyttäminen kasvatti kokonaislämmityskustannuksia 2 995 €. Kuvassa 40 on esitetty kuukausikohtainen lämmityskustannusten jakautuminen.



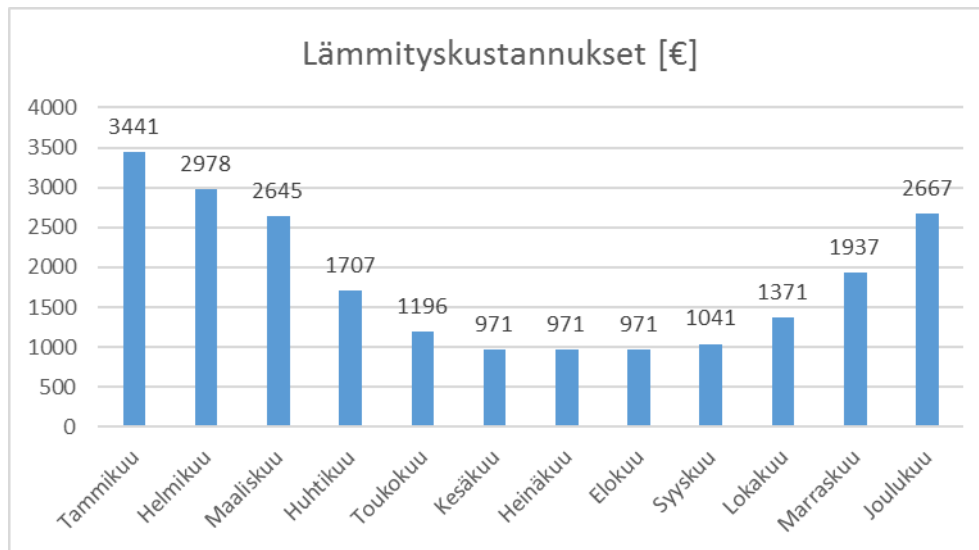
**Kuva 40.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset perinteisellä ilmanvaihdolla.

Haettaessa suurinta mahdollista lämpöpumpun tuottoa kytketään ilmanvaihto täydelle nopeudelle koko ajaksi. Tämän järjestelmän vuotuiset lämmityskustannukset käyttökerroin huomioiden ovat 27 841 €. Tuottokertoimen käyttäminen kasvatti lämmityskustannuksia 4 196 €. Kuvassa 41 on esitetty järjestelmän kuukausikohtainen lämmityskustannusten jakautuminen.



**Kuva 41.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset tehostetulla ilmanvaihdolla.

Ohjattaessa poistoilmavirran tehostusta ulkoilman lämpötilan mukaan saadaan vuosittaisiksi lämmityskustannuksiksi 21 897 €. Ero järjestelmään ilman tuottokorjausta on 2 797 €. Kuukausikohtainen lämmityskustannusten jakautuminen on esitetty kuvassa 42.



**Kuva 42.** Kuukausikohtaiset lämmityskustannukset lämpötilan mukaan ohjatulla ilmanvaihdolla.

Tuottokertoimella on suuri vaikutus vuotuisiin lämmityskustannuksiin. Suurin vaikutus havaittiin tehostetun ilmanvaihdon periaatteella. Loogisesti ajateltuna vaikutus pitäisikin olla tässä järjestelmässä suurin, sillä lämpöpumpun tuotto on myös suurin. Taulukossa 9 esitetty eri järjestelmien vuotuiset kustannukset ja kustannusero alkuperäiseen.

**Taulukko 9.** Vuosikustannusten vertailu.

Järjestelmä	Kustannukset [€/vuosi]	Ero alkuperäiseen [€]
Alkuperäinen	35 966	0
Perinteinen	23 091	12 875
Tehostus	27 841	8 125
Lämpötilaohjaus	21 897	14 069

## 6.4 Järjestelmän optimointi

Järjestelmän optimoinnilla tarkoitetaan tässä tapauksessa lämmityskustannusten minimoimista. Lämmityskustannuksiin vaikuttavat merkittävästi lämmitysenergioiden hinnat. Lämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttavat kylmäaineen höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat.

Järjestelmän ohjaus voitaisiin toteuttaa algoritmilla. Algoritmin muuttuvia tekijöitä ovat kaukolämmön reaaliaikainen hinta, sähkön reaaliaikainen hinta, lämpöpumpun lämpökerroin ja tuotetun energian hinta. Algoritmi ohjaa poistoilmavirran määrää ja tätä kautta lämpöpumpun tehoa. Yksinkertaistetusti lämpöpumpun tuottama energia pyritään maksimoimaan, kun lämpökertoimen suhde korvausilman lämpötilaan on riittävän hyvä.

Lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian hinta voidaan laskea kaavalla

$$\epsilon_L = \epsilon_S / \text{COP}, \quad (9)$$

missä  $\epsilon_L$  lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian hinta,  $\epsilon_S$  on sähkön hinta ja COP on lämpökerroin. Lämpöpumpun tuotto on suoraan verrannollinen korvausilman lämmitysenergiaan, kun poistoilman lämmönmuutos on vakio.

Poistoilmavaihdosta voidaan tehdä kaksinopeuksinen. Tehostusilmavirtaa ei päästetä kytkeytymään, kun ulkoilman lämpötila alittaa kriittisen pisteen. Kriittinen piste muodostuu energianhintojen ja lämpökertoimen suhteesta. Kriittistä korvausilman lämpötilaa voidaan arvioida kaavalla

$$T_u = (1 - \epsilon_S / \text{COP} / \epsilon_L) \Delta T / (1 - 1 / \text{COP}) + T_s, \quad (10)$$

missä  $T_u$  on korvausilman lämpötila,  $\epsilon_S$  on sähkön hinta, COP on lämpökerroin,  $\epsilon_L$  on kaukolämmön hinta,  $\Delta T$  on poistoilman jäähtymä lämmönsiirtimessä ja  $T_s$  on sisälämpötila. Kaava huomioi ulkoilman lämpötilan vaikutuksen patteriverkoston lämpötilaan ja korvausilman lämmittämiseen kuluvan energian.

Keruupiirin paluunesteen lämpötilan ollessa 0 astetta, noudattaa Thermia Mega L-lämpöpumpun lämpökerroin keskimäärin kaavaa

$$\text{COP} = -0,0747T_p + 6,9105 \quad (\text{Thermia 2015}), \quad (11)$$

missä  $T_p$  on patteriverkoston lämpötila. Patteriverkoston lämpötila noudattaa tässä tapauksessa kaavaa

$$T_p = -1,087T_u + 41,74, \quad (12)$$

missä  $T_u$  on ulkoilman lämpötila. Sijoittamalla kaavaan 11 kaava 12 voidaan lämpökerroin kirjoittaa muotoon

$$\text{COP} = 0,0812T_u + 3,79, \quad (13)$$

sijoittamalla yhtälöön 10 lämpökertoimen tilalle yhtälö 13 saadaan yhtälö

$$T_u = (1 - \epsilon_S / (0,0812T_u + 3,79) / \epsilon_L) \Delta T / (1 - 1 / (0,0812T_u + 3,79)) + T_s, \quad (14)$$

josta iteroimalla voidaan laskea kriittinen piste ulkoilman lämpötilan mukaan. Iteroimalla saadaan tulos +5,4 astetta. Ilmavirta kannattaa siis kytkeä pienimmälle mahdolliselle nopeudelle, kun ulkoilman lämpötila alittaa tämän kriittisen arvon. Tuloksessa on huomiotava, että se pätee ainoastaan tietylle lämpöpumpulle ja tietylle lämmitysverkoston säätökäyrälle. Lisäksi kaukolämmön ja sähkön hinnan muuttuessa myös kriittinen piste muuttuu.

Tarkasteltaessa lämmityskustannuksia kuukausittain, voidaan havaita pienimpien lämmityskustannusten muodostuvan pienimmällä poistoilmavirralla. Järjestelmän optimoinnissa kannattaa keskittyä poistoilmavirran minimoimiseen asumismukavuudesta ja määräyksistä tinkimättä.

## 7. JÄRJESTELMÄN ELINKAARI

Järjestelmän elinkaarella tarkoitetaan tuotteen koko elinkaarta alkaen suunnittelusta ja päättyen käytöstä poistoon. Järjestelmän kannattavuuden arvioinnissa tulee huomioida elinkaarikustannukset ja elinkaarituotot. Järjestelmän hankintapäätöksessä elinkaarituotosten ja kustannusten arvioinnilla on suuri merkitys.

Elinkaarikustannuksilla tarkoitetaan kaikkia kustannuksia, joita syntyy järjestelmän käytön aikana. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmälle elinkaarikustannukset muodostuvat laitteiston hankinnasta, valvonnasta, huollosta ja käytöstä poistosta.

Elinkaarituotossa arvioidaan poistoilmalämpöpumpun tuottamaa säästöä lämmityskuluissa. Energianhintojen oletetaan muuttuvan. Tässä diplomityössä kaukolämmön hinnannousu on 3 % vuodessa ja sähkön hinnannousu on 2 % vuodessa.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän elinkaareksi arvioidaan 25 vuotta. Huoltokustannuksiksi arvioidaan kompressorien ja kylmäaineen vaihto 10 vuoden välein. Vuosihuollossa vaihdetaan mahdolliset keruupatterin suodattimet ja tarkastetaan järjestelmän kunto.

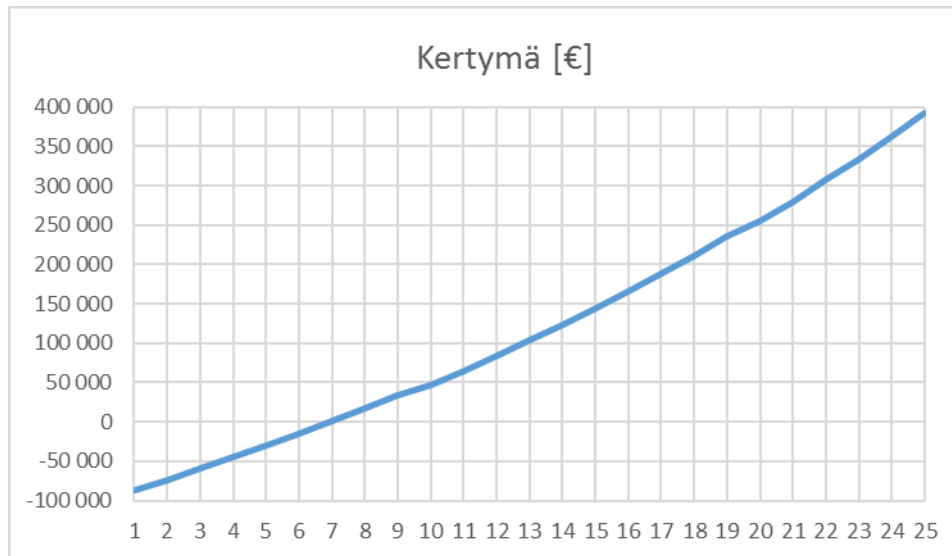


As Oy Itäviitassa vuosihuollon hinnaksi arvioidaan 350 €/vuosi. Kompressorien ja kylmäaineen vaihdon hinnaksi arvioidaan 5000 €/kerta. Järjestelmän valvonnan hinnaksi arvioidaan 600 €/vuosi. Huolto- ja valvontakulujen arvioidaan kasvavan 2 % vuodessa. Kompressorin ja kylmäaineen vaihdon hinnan oletetaan pysyvän vakion. Järjestelmän hankintahinnaksi arvioidaan 100 000 €. Hankintahinta perustuu linjasaneerauksen yhteydessä toteutettavaan järjestelmään, jossa keruuputkien vedot ovat erillisurakka. Taulukossa 10 on esitetty vuosittainen säästö, vuosittaiset kustannukset ja kustannussäästön kertymä. Aluksi kertymä on negatiivinen johtuen suurista hankintakustannuksista..

**Taulukko 10. Järjestelmän elinkaarituotto.**

Vuosi	Säästö [€]	Kustannukset [€]	Kertymä [€]
1	13 889	100 600	-86 711
2	14 410	969	-73 270
3	14 956	988	-59 302
4	15 501	1008	-44 809
5	15 997	1028	-29 840
6	16 186	1048	-14 702
7	16 773	1069	1 002
8	17 404	1090	17 316
9	18 035	1112	34 239
10	18 691	6 134	46 796
11	19 372	1157	65 011
12	20 088	1180	83 919
13	20 671	1204	103 386
14	21 428	1228	123 586
15	22 195	1252	144 529
16	22 942	1277	166 194
17	23 699	1303	188 590
18	24 179	1396	211 373
19	25 072	1423	235 022
20	25 970	6451	254 541
21	27 074	1480	280 135
22	28 074	1509	306 700
23	29 108	1539	334 269
24	30 139	1570	362 838
25	31 196	1601	392 433

Säästökertymästä saa paremman käsityksen, kun se esitetään kuvaajana. Kuvassa 43 on havainnollistettu järjestelmän takaisinmaksua ja tuottoa. Järjestelmä maksaa itsensä takaisin noin seitsemässä vuodessa.



**Kuva 43.** Järjestelmän elinkaarituohto.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän tuotoksi 25 vuoden ajalla saadaan noin 390 000 euroa. Laskennassa käytetty malli on lämpötilaohjaus. Arvion todenperäisyys saattaa vaihdella suurestikin. Toteutuneisiin säästöihin vaikuttava kaukolämmön ja sähkön todelliset hintakehitykset.

## 8. YHTEENVETO

Hyvin toteutettuna poistoilmalämpöpumppujärjestelmällä voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä kiinteistön lämmityskustannuksissa. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän toteutuksessa on tärkeää oikea komponenttien mitoitus ja järjestelmän toimintaperiaate. Lämpöpumpun tuoton maksimoinnin sijaan järjestelmässä tulee keskittyä kokonaislämmityskustannusten minimoimiseen.

Järjestelmä on helppoin rakentaa linjasaneerauksen yhteydessä. Linjasaneerauksen yhteydessä keruuputkistojen veto voidaan tehdä edullisesti ja helppoja reittejä pitkin. Lisäksi poistoilmalämpöpumppujärjestelmän kustannukset ovat pieni osa linjasaneerauksesta, joten hankintapäätös on taloyhtiölle helpompi tehdä linjasaneerauksen yhteydessä. Järjestelmän hintaan vaikuttaa merkittävästi poistoilmapuhaltimien lukumäärä. Kannattavinta järjestelmä on toteuttaa kiinteistössä, jossa on vain yksi koneellinen poistoilmakone. Mikäli poistoilmakoneita on enemmän tulee arvioida, kannattaako niitä kanavien avulla yhdistää toisiinsa vai asennetaanko jokaiselle poistopisteelle oma lämmönsiirrin.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän kannattavuutta tulee aina arvioida kiinteistökohtaisesti. Kannattavuuteen vaikuttavat järjestelmän toteutuskustannukset ja toteutuva rahallinen säästö lämmityskustannuksissa. Lämmityskustannusten rahallista säästöä voidaan arvioida vasta vuosien jälkeen toteutuksesta. Tästä syystä säästölaskelmiin on syytä panostaa riittävän luotettavuuden takaamiseksi.

Asunto Oy Itäviitassa poistoilmalämpöpumpulla voidaan teoriassa saavuttaa 14 069 € vuotuiset säästöt lämmityskustannuksissa. Todellisuudessa näin suureen säästöön ei päästä, vaan lämpöpumpun toimintaan tulee keskeytyksiä. Vaikka säästöistä vähennettäisiin 30 % epävarmuustekijöiden johdosta, näyttää tulos silti hyvältä mahdollista toteutusta ajatellen.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmä vaatii riittävän taloautomaationjärjestelmän ollakseen kunnolla seurattavissa ja säädettävissä. Automaatiojärjestelmän on oltava etäkäytävissä ja tieto mahdollisista häiriötilanteista on oltava saatavissa.

## LÄHTEET

A. Aittomäki. (2012). Kylmäteknikka, 4. painos, Bookwell Oy, s. 413

Camfil. Kuinka mitata suodattimet. Saatavissa: <https://camfil-kauppa.camfil-farr.net/fi/Listningar1/Select-help-section/How-to-measure-a-filter/>

Ebm-papst. (2008). ECPUHALTIME, s. 1. Saatavissa: [http://www.eb-mpapst.fi/fi/dat/media\\_manager/news/8/news-files/Tietoisku\\_\\_Mita\\_eri-koista\\_EC-puhaltimissa.pdf](http://www.eb-mpapst.fi/fi/dat/media_manager/news/8/news-files/Tietoisku__Mita_eri-koista_EC-puhaltimissa.pdf)

Ekocoil. Lamellipatterit. Saatavissa: [http://www.ekocoil.fi/assets/lamellipatterit\\_uusi\\_pohja.pdf](http://www.ekocoil.fi/assets/lamellipatterit_uusi_pohja.pdf)

Energiateollisuus. K1/2013. (2014). Rakennusten kaukolämmitys, s. 92 Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1\\_2013\\_20140509.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/julkaisuk1_2013_20140509.pdf)

Eurooppalaisen standardin EN 378-1. (2000). Saatavissa: <http://server2.docfoc.com/uploads/Z2015/11/30/sburL0ohIn/12aa943fec325fde7a301cc006e81994.pdf>

Fläktwoods. Lamellipatterit. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=9cc00cc1-7e4d-45e9-b4bd-c089429151a0>

H. Lamminaho. (2012). LVI-Talotekniikkajärjestelmät. Saatavissa: <http://slideplayer.biz/slide/1933869/>

J. Virta, P. Pylsy. (2011). Taloyhtiön energiakirja, 1. painos, Sitra 295, s. 196 Saatavissa: <http://www.taloyhtio.net/ajassa/energiakirja/>

Koja. (2015) Esite Hifek-huippuimurit, s.26 Saatavissa: <http://www.koja.fi/fi/materiaalipankki/rakennukset/huippu-ja-savuimurit>

LVI 11-10329. (2001) Paisuntajärjestelmän valinta ja mitoitus, s. 6. Saatavissa: [https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5ecztM8oF/5efG5yDTz/Files/CurrentFile/LVInayte\\_1110329.pdf](https://www.rakennustieto.fi/material/attachments/5ecztM8oF/5efG5yDTz/Files/CurrentFile/LVInayte_1110329.pdf)

M. Rämä, R. Niemi, L. Similä. (2015). Poisoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä, VTT, s. 93. Saatavissa: [www.ym.fi/download/name/%7B730346C8-01D2-49FB-B9EA.../111934](http://www.ym.fi/download/name/%7B730346C8-01D2-49FB-B9EA.../111934).

Ouman. Yksikkösäätimet. Saatavissa: <http://ouman.fi/palvelut/rakennusautomaatio/yksikkosaatimet/>

Ramentor. Elinkaarikustannukset. Saatavissa: <http://www.ramentor.com/etusivu/teoria/elinkaarikustannukset/>

Retermia. LTO-huippuimurit. Saatavissa: <http://www.retermia.fi/wp-content/uploads/2016/10/LTO-Huippuimuri.pdf>

Ympäristöministeriö. Aurinko-opas 2012. Saatavissa: [www.ym.fi/download/noname/%7BF4F73E83-56AF-4112-AD7B.../30750](http://www.ym.fi/download/noname/%7BF4F73E83-56AF-4112-AD7B.../30750)

Ympäristöministeriö. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D2. Saatavissa: <http://www.ym.fi/Rakentamismaarayskokoelma>

Ziehl-abegg. Hyrräpuhaltimet. Saatavissa: <http://www.ziehl-abegg.com/fi/en/>