



Ilma-ilmalämpöpumppujen energiankulutusvaikutukset pientaloissa

Ari Laitinen



Ilma-ilmalämpöpumppujen energiankulutusvaikutukset pientaloissa

Ari Laitinen

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy



ISBN 978-951-38-8437-6 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)

VTT Technology 262

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Verkkójulkaisu)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8437-6>

Copyright © VTT 2016

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

PL 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

02044 VTT

Puh. 020 722 111, faksi 020 722 7001

Teknologiska forskningscentralen VTT Ab

PB 1000 (Teknikvägen 4 A, Esbo)

FI-02044 VTT

Tfn +358 20 722 111, telefax +358 20 722 7001

VTT Technical Research Centre of Finland Ltd

P.O. Box 1000 (Tekniikantie 4 A, Espoo)

FI-02044 VTT, Finland

Tel. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7001

Esipuhe

Energiankulutuksen vähentämiseksi vuoteen 2020 mennessä on EU-tasolla tehty ja tekeillä toimenpiteitä, jotka vaikuttavat rakennussektorilla kokonaisvaltaisesti sekä rakennustuotteisiin että rakentamiseen.

Kansallisten rakentamismääräysten kehitystyön pohjaksi tarvittiin yhdessä ilma-ilmalämpöpumpputoimijoiden kanssa tutkimushanke, jossa arvioitiin luotettavilla menetelmillä ilma-ilmalämpöpumppujen toimivuutta erityisesti pientaloissa. Tämän projektin tavoitteina oli selvittää ilma-ilmalämpöpumppujen mahdollisuuksia hyödyntää uusiutuvaa energiaa pientaloissa ja määrittää reunaehdoja tälle hyödyntämiselle. Projektissa selvitettiin ilma-ilmalämpöpumppujen käytön ja lämmitystehon vaikutusta lämmitystehokkuuteen ja lämmityshyötysuhteeseen niin, että ilma-ilmalämpöpumput voidaan ottaa huomioon aikaisempaa paremmin ja luotettavammin tulevaisuudessa kansallisissa energiamääräyksissä.

Projektin ovat rahoittaneet ympäristöministeriö, Suomen lämpöpumppuyhdistys ry sekä Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Projektin toteutuksesta on vastannut VTT, ja ohjausryhmätyöskentelyyn ovat osallistuneet Pekka Kalliomäki (ympäristöministeriö), Maarit Haakana (ympäristöministeriö), Jyrki Kauppinen (ympäristöministeriö), Jussi Hirvonen (Suomen lämpöpumppuyhdistys ry), Sami Seuna (Motiva Oy), Riikka Holopainen (VTT) sekä Ari Laitinen (VTT).

Espoo, 4.5.2016

Ari Laitinen

Sisällysluettelo

Esipuhe.....	3
Symboliluettelo.....	6
1. Johdanto.....	8
2. Ilmalämpöpumpun lämmöntuoton yksinkertaiset laskentamenetelmät.....	11
2.1 Laskennallinen menetelmä.....	11
2.1.1 Nettosäästö, $Q_{ILP,uusiutuva}$	11
2.1.2 Sähkökäyttö, $Q_{ILP,sähkö}$	11
2.1.3 Nettotuotto, $Q_{ILP,netto}$	11
2.1.4 Vuosikerroin, SKER.....	12
2.1.5 Maksimituotto, $Q_{ILP,max}$	13
2.2 Yksinkertaistettu menetelmä.....	13
3. Ilma-ilmalämpöpumppujen lämmöluovutuksen hyötysuhde.....	15
3.1 Lämmöntuotto.....	15
3.1.1 Kokonaishyötysuhteen määrittäminen simuloimalla.....	15
3.1.2 Lämpöolosuhteet.....	16
3.1.3 Äniolosuhteet.....	17
4. Käytetyt menetelmät ja laskentatapausten reunaehdot.....	18
4.1 Laskentatyökalu.....	18
4.2 Ilmalämpöpumput.....	18
4.2.1 Ilma-ilmalämpöpumppujen simulointimallit.....	19
4.3 Säätiiedot.....	22
4.4 Rakennukset.....	23
4.4.1 Erillinen pientalo, uudisrakennus.....	24
4.4.2 Erillinen pientalo, korjauskohde.....	26
5. Tulokset.....	30
5.1 Kaksikerroksinen uusi rakennus.....	30
5.1.1 Ilmalämpöpumppujen nettotuotto ja osuus lämmöntuotosta.....	30
5.1.2 Ostoenergian säästö, vuosilämpökerroin ja kokonaishyötysuhde ..	32
5.2 Yksikerroksinen vanha rakennus.....	35
5.2.1 Ilmalämpöpumppujen nettotuotto ja osuus lämmöntuotosta.....	36
5.2.2 Ostoenergian säästö, vuosilämpökerroin ja kokonaishyötysuhde ..	36
5.3 Ilmaston vaikutus ilma-ilmalämpöpumpun tuottoarvoihin.....	39
6. Yhteenveto ja johtopäätökset.....	41
6.1 Kaksikerroksinen uusi rakennus.....	41
6.2 Yksikerroksinen vanha rakennus.....	44

Liitteet

Liite A: Tulokset nykyisten määräysten mukaisella kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella, vain alakertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite B: Tulokset passiivitason (lähes nollaenergia) kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella, vain alakertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite C: Tulokset nykyisten määräysten mukaisella kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella sekä ala- että yläkertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite D: Tulokset passiivitason (lähes nollaenergia) kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella sekä ala- että yläkertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite E: Tulokset vanhalla yksikerroksisella rakennuksella ja realistisella ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite F: Tulokset peruskorjatulla yksikerroksisella rakennuksella ja realistisella ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Liite G: Esimerkki ilma-ilmalämpöpumpun maksimituoton ja sitä vastaavan SCOP-arvon laskennasta

Liite H: Ilma-ilmalämpöpumpun IDA-ICE-malli

Tiivistelmä

Abstract

Symboliluettelo

$Q_{ILP,rakennus}$	on rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmönkulutus, kun rakennukseen on asennettu ilmalämpöpumppu.
$Q_{ILP,uusiutuva}$	on ilmalämpöpumpun uusiutuvan energian vuotuinen nettokäyttö, joka on sama kuin ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen ostoenergian säästö.
$Q_{ILP,säästö}$	on ilma-ilmalämpöpumpun ostoenergian nettosäästö, joka on sama kuin uusiutuvan energian nettokäyttö.
$Q_{ILP,netto}$	on ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen nettolämmöntuotto, joka pitää sisällään myös kompressorin sähkön.
$Q_{ILP,sähkö}$	on ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen sähkönkäyttö, joka lasketaan ilma-ilmalämpöpumpun bruttotuotosta ($Q_{ILP,brutto}$).
$Q_{ILP,brutto}$	on ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen bruttolämmöntuotto, joka on ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen nettotuotto + rakennuksen lisääntyneet lämpöhäviöt ilma-ilmalämpöpumpun käytön vuoksi. On sama kuin ilmalämpöpumpun sisäyksikön rakennukseen tuoma lämmitysenergia. Rakennuksen lämpöhäviöt lisääntyvät, koska ilma-ilmalämpöpumpun asetusarvo pidetään tarkasteluissa korkeampana kuin vertailutilanteessa. Vertailutilanteessa kaikkien huoneiden lämpötila pidetään +21 °C:ssa paitsi pesuhuoneessa, jossa lämpötila on +22 °C.
$Q_{ILP,max}$	on ilma-ilmalämpöpumpun maksimituotto laskettuna ilmalämpöpumpun energiamerkinnässä pohjoiselle ilmastovyöhykkeelle annettujen vuosilämpökertoimen (SCOP) ja vuotuisen sähkönkäytön tulona.
Q_{ref}	on rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmöntarve vertailutilanteessa, jolloin rakennukseen ei ole asennettu ilma-ilmalämpöpumppua.
SKER	on ilma-ilmalämpöpumpun vuosikerroin, joka lasketaan lämpöpumpulle energiamerkinnässä ilmoitetusta vuosilämpökertoimesta pohjoiselle ilmastovyöhykkeelle (SCOP), ottaen huomioon ilmalämpöpumpun lämmönjaon hyötysuhde ja alenema, joka johtuu lämpöpumpun melureunaehdon aiheuttamasta sisäyksikön ilmavirran rajoituksesta.
SCOP	on ilma-ilmalämpöpumpun vuosilämpökerroin, jossa ei ole otettu huomioon ilma-ilmalämpöpumpun lämmönjaon hyötysuhdetta. Saadaan energiamerkinnässä pohjoiselle ilmastolle määritettynä tai voidaan määrittää laskennallisesti ottaen huomioon ilma-ilmalämpöpumpun ominaisuudet ja rakennuksen lämmöntarve.
A_{ILP}	on välittömästi ilma-ilmalämpöpumpun kanssa tekemisissä olevan rakennuksen yhtenäisen tilan pinta-ala, joka määritellään sisäovilla rajatun alueen pinta-alaaksi.
$A_{netto,ILP}$	on asunnon samassa tasossa kuin mihin ilmalämpöpumppu on asennettu tai sen yläpuolisten kerrosten lämmitettyjen kerrostasoalojen summa kerrostasoja ympäröivien ulkoseinien sisäpintojen mukaan laskettuna, m ² .

$Q_{\text{tilat+iv}}$	on rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon ominaislämmöntarve, kWh/m ² .
$\eta_{\text{lämmönlvovutus}}$	on ilma-ilmalämpöpumpun lämmönjaon vuosihyötysuhde, joka ottaa huomioon ilmalämpöpumpun käytöstä aiheutuvat rakennuksen lisälämpöhäviöt.
$\eta_{\text{lämmitys}}$	on ilma-ilmalämpöpumpun hyötysuhde, joka ottaa huomioon ilmalämpöpumpun käytöstä aiheutuvat rakennuksen lisääntyneet lämpöhäviöt, jotka johtuvat vertailutilannetta korkeammasta huonelämpötilasta.
$\eta_{\text{kerrostuma}}$	on ilma-ilmalämpöpumpun hyötysuhde, joka ottaa huomioon lämmönjakotavan aiheuttaman rakennuksen lisälämpöhäviön, joka johtuu huonelämpötilan epäideaalisesta lämpötilakerrostumasta.
η_{rakenne}	on ilma-ilmalämpöpumpun hyötysuhde, joka ottaa huomioon mahdolliset ilmalämpöpumpun sisäyksikön asennuspaikan aiheuttamat suoraan rakenteiden kautta ulkoilmaan johtuvat lisälämpöhäviöt.

1. Johdanto

Energiankulutuksen vähentämiseksi vuoteen 2020 mennessä on EU-tasolla tehty ja tekeillä toimenpiteitä, jotka vaikuttavat rakennussektorilla kokonaisvaltaisesti sekä rakennustuotteisiin että rakentamiseen. Ilma-lämpöpumpuilla on merkittävä rooli rakennusten energiatehokkuudessa ja uusiutuvan energian käytössä. Ilma-ilmalämpöpumppuja (ILP) on Suomessa asennettuna pientaloihin ja jonkin verran myös kerrostaloihin yli 500 000 kappaletta. Sulpun ylläpitämän myyntitilaston mukaan vuotuinen ilma-ilmalämpöpumppujen myyntimäärä on noin 50 000 kpl/a (Suomen lämpöpumppuyhdistys ry).



Kuva 1. Rakennusten energiatehokkuuden parantamisen ja uusiutuvien energialähteiden edistämistoimet EU:ssa.

Vuoden 2012 kesällä voimaan tulleessa Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 (Rakennusten energiatehokkuus) on rakennuksen vaatimuksen mukaisuuden osoittamisessa, laskettaessa rakennuksen kokonaisenergiatukua (E-luku), määritelty ilma-ilmalämpöpumpulla tilaan saatavaksi lämmitysenergiaksi korkeintaan 1000 kWh vuodessa lämpöpumppua kohden. Vastaavasti rakentamismääräyskokoelman osassa D5 ilma-ilmalämpöpumppujen vuotuisena lämpökertoimena ohjeistetaan käyttämään arvoa 2,8 (säävyöhykkeet I–III), ellei tarkempaa tietoa ole käytettävissä (Suomen rakentamismääräyskokoelma osat D3 ja D5). Tarkemmin ilma-ilmalämpöpumpun vuosihyötysuhde voidaan määrittää ympäristöministeriön julkaiseman oppaan ohjeistuksella (Lämpöpumppujen energialaskentaopas 3.10.2012) tai lämpöpumppujen SPF-laskentaohjeella (Laitinen ym. 2014).

Ilma-ilmalämpöpumpuille on olemassa standardi SFS-EN 14511:2011, jossa esitetään testausmenetelmät mm. täyden tehon lämpökertoimen ja lämmitystehon määrittämiseksi. Standardissa 14825:2013 esitetään menetelmä lämpöpumppujen osatehon suoritusarvojen mittaamiseksi sekä lämpöpumppujen vuosilämpökertoimen laskenta. Lämpöpumppujärjestelmien järjestelmätehokkuuden laskenta on puolestaan esitetty standardissa 15316:2008. Ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta ilmalämpöpumppujen energiamerkintään liittyy komission asetus (EU) N:o 626/2011, joka täydentää Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviä 2010/30/EU.



Kuva 2. Uusimmat ja lähitulevaisuudessa odotettavissa olevat rakennusten energiatehokkuuden parantamisen ja uusiutuvien energialähteiden edistämistoimet Suomessa.

Edellä mainituissa ohjeissa ja standardeissa ei oteta huomioon lämmön leviämisen vaikutusta rakennuksessa eikä käyttötavan tai mitoituksen vaikutusta ilma-ilmalämpöpumpun vuotuisiin tuottoarvoihin. Ilmalämpöpumput ovat merkittävässä osassa uusiutuvan energian käytön lisäämisessä sekä olemassa olevassa rakennuskannassa että tulevaisuuden nollaenergiarakennuksissa. Lisäksi ilma-ilmalämpöpumppujen tekninen kehitys on ollut voimakasta viimeisten vuosien aikana. Lämpöpumput tuottavat lämpöä entistä kylmemmissä olosuhteissa (jopa alle -25 °C ulkoilman lämpötiloissa), ja osateholla lämpökertoimet ovat parantuneet invertteriteknikan ansiosta. Mainittakoon, että ilma-ilmalämpöpumput toimivat osateholla suurimman osan käyttöajasta. Kaikkinaisen kehitystyön pohjaksi tarvitaan yhdessä ilmalämpöpumpputoimijoiden kanssa tutkimushanke, jossa arvioidaan luotettavilla menetelmillä ilma-ilmalämpöpumppujen toimivuutta.

Projektin tavoitteina oli selvittää ilma-ilmalämpöpumppujen mahdollisuuksia hyödyntää uusiutuvaa energiaa pientaloissa ja määrittää reunaehdot tälle hyödyntämiselle. Projektissa selvitettiin ilma-ilmalämpöpumppujen käytön ja energiatehokkuudeltaan eritasoisten laitteiden vaikutusta lämmitystehokkuuteen, uusiutuvan energian käyttöön ja vuosilämpökertoimeen. Reunaehtoina tarkastelussa olivat rakennusten lämmitystehontarpeet, rakennusten massoitelu, ilma-ilmalämpöpumpun lämmöntuotto- ja ääniominaisuudet sekä käyttäjän vaikutukset.

Käyttäjän vaikutukset energiankulutukseen ovat merkittävät. Energiankulutukseen vaikuttavat, paitsi valittu ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo, jota tässä tutkimuksessa on tarkasteltu, niin myös laitteen muut asetukset ja päälämmitysjärjestelmän huonesäätimien asetukset. Talvella lämmityskäytössä ilma-ilmalämpöpumpun asetukseksi kannattaa valita lämmitystoiminto (eng. heating) eikä automaattitoimintoa. Automaattiasetuksella laite välillä lämmittää ja välillä myös jäädyttää, lisäten näin energiankulutusta. Kesällä, jäähdytettäessä kannattaa valita jäähdytysasetus (eng. cooling) ja välttää myös tällöin automaattiasetusta. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu vain lämmityskäyttöä ja laitteet on asetettu pelkästään lämmitysmoodiin. Energiankulutukseen vaikuttaa myös sisäyksikön puhallustehon valinta. Energiatehokkain valinta on automaattiasetus, jolloin laite valitsee kulloiseenkin tilanteeseen sopivan optimaalisen puhallusnopeuden. Tällöin laitteen aiheuttama melu ja huoneen ilmavirtaukset saattavat ajoittain nousta epämiellyttäväiksi. Tässä tutkimuksessa sisäyksikön puhallinasetus on kiinnitetty keskiasentoonsa, jolloin laitteen huoneeseen aiheuttama melu täyttää määräysten melukriteerin uusien rakennusten osalta. Ilmalämpöpumpun energiansäästöä voidaan lisätä asettamalla esimerkiksi makuuhuoneiden lämmityspattereiden huonelämpötilan asetusarvot muita oleskelutiloja alhaisemmiksi. Tässä selvityksessä näin ei ole

tehty, vaan laskennallisissa tarkasteluissa pöytälämmitysjärjestelmän huonelämpötilojen asetusarvot on kiinnitetty määräysten mukaiseen tasoon +21 °C (pesuhuoneissa +22 °C).

2. Ilmalämpöpumpun lämmöntuoton yksinkertaiset laskentamenetelmät

Seuraavassa on esitetty kaksi mahdollista tapaa käsitellä ilma-ilmalämpöpumpun vaikutuksia rakennuksen lämmitysenergiankulutukseen.

2.1 Laskennallinen menetelmä

Tässä on esitetty yksinkertainen laskennallinen menetelmä, jolla ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto, uusiutuvan energian käyttö ja sähkönkäyttö voitaisiin määrittää laskennallisesti hyödyntäen ilma-ilmalämpöpumpun energiamerkintää kylmälle ilmastovyöhykkeelle.

2.1.1 Nettosäästö, $Q_{ILP,uusiutuva}$

Ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen nettosäästö (= uusiutuvan energian käyttö) lasketaan seuraavasti:

$$Q_{ILP,uusiutuva} = Q_{ILP,netto} * \left(1 - \frac{1}{SKER}\right) \quad (1)$$

$Q_{ILP,uusiutuva}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen nettosäästö, kWh/a
 $Q_{ILP,netto}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen nettotuotto, kWh/a
SKER on ilmalämpöpumpun vuosikerroin

2.1.2 Sähkönkäyttö, $Q_{ILP,sähkö}$

Ilmalämpöpumpun vuotuinen sähkönkäyttö lasketaan kaavasta:

$$Q_{ILP,sähkö} = \frac{Q_{ILP,netto}}{SKER} \quad (2)$$

jossa

$Q_{ILP,sähkö}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen sähkönkäyttö, kWh/a
 $Q_{ILP,netto}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen nettotuotto, kWh/a
SKER on ilmalämpöpumpun vuosikerroin

2.1.3 Nettotuotto, $Q_{ILP,netto}$

Ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto lasketaan rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuisesta lämmitysenergiantarpeesta. Se lasketaan pinta-alojen sekä tilojen ja ilmanvaihdon ominaislämmitystarpeen perusteella kaavalla:

$$Q_{ILP,netto} = (A_{ILP} + 0,1 * (A_{netto,ILP} - A_{ILP})) * q_{tilat+iv} \quad (3)$$

jossa	
A_{ILP}	on välittömästi ilmalämpöpumpun kanssa tekemisissä olevan yhtenäisen tilan pinta-ala, joka määritellään sisäovilla rajatun alueen pinta-alaksi, m^2
$A_{netto,ILP}$	on asunnon samassa tasossa kuin mihin ilmalämpöpumppu on asennettu tai sen yläpuolisten kerrosten lämmitettyjen kerrostasojen summa kerrostasoja ympäröivien ulkoseiniensä sisäpintojen mukaan laskettuna, m^2
0,1	on kerroin, jolla otetaan huomioon lämmön leviäminen rakennuksessa laajemmin kuin vain tilaan, johon ilmalämpöpumppu on asennettu
$Q_{tilat+iv}$	on tilojen ja ilmanvaihdon ominaislämmöntarve, kWh/m^2

Yhdelle ilmalämpöpumpulle laskettu $Q_{ILP,netto}$ ei voi kuitenkaan olla suurempi kuin lämpöpumpulle energiamerkinnän tietojen mukaan laskettu maksimituotto ($Q_{ILP,max}$). Maksimituoton laskenta on esitetty myöhemmin erikseen.

Kun asunnossa on useampia lämpöpumppuja:

- 1) Samassa tasossa olevien lämpöpumppujen tapauksessa jaetaan muiden kuin ilmalämpöpumppujen kanssa välittömästi tekemisissä olevien tilojen pinta-alat esimerkiksi tasan lämpöpumppujen kesken. Kokonaispinta-ala ei voi olla suurempi kuin kerrostason pinta-ala.
- 2) Kahdessa päällekkäisessä kerroksessa sijaitsevien lämpöpumppujen tapauksessa ei alemman pumpun vaikutuspiiriin voi laskea ylemmän kerroksen pinta-ala. Sen sijaan jos rakennuksessa on esimerkiksi kolme kerrosta ja lämpöpumput sijaitsevat alimmassa ja ylimmässä kerroksessa, voidaan alemman pumpun vaikutuspiiriin laskea osa keskimmäisestä kerroksesta.

2.1.4 Vuosikerroin, SKER

Ilma-ilmalämpöpumpun vuosikerroin määritellään kaavalla

$$SKER = (SCOP - 0,3) * \eta_{lämmönluovutus} \quad (4)$$

jossa	
SKER	on vuosikerroin
SCOP	on kylmälle ilmastolle energiamerkinnässä ilmoitettu vuosilämpökertoimen arvo
0,3	on sisäyksikön äänirajoituksesta johtuva vakiokorjaus, jolla otetaan huomioon sisäyksikön ilmavirtauksen puolituksen vaikutus lämpökertoimeen
$\eta_{lämmönluovutus}$	on ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde (= 0,85)

Vuosilämpökerroin, SCOP, saadaan seuraavasti:

- 1) Energiamerkinän kylmälle ilmastolle määritettyä SCOP-arvoa voidaan käyttää suoraan, jos $Q_{ILP,netto} < Q_{ILP,max}$.
- 2) Jos $Q_{ILP,netto} > Q_{ILP,max}$, käytetään nettotuotolle arvoa $Q_{ILP,max}$ sekä kylmälle ilmastolle määritettyä SCOP-arvoa.
- 3) Jos SCOP-arvo on määritetty vain Keski-Euroopan sääolosuhteissa, voidaan se laskea olemassa olevien tietojen (energiamerkinässä ilmoitettujen lämmitystehojen ja COP-arvojen) perusteella standardia EN 14825 (paremminkin COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 626/2011) soveltaen kylmälle ilmastolle.
- 4) Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää tarkempia laskelmia nettotuoton ja SCOP-arvon määrittämiseksi.
- 5) Jos SCOP-arvoa ei voida muutoin varmistaa, käytetään arvoa 2,8.

Lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde ottaa huomioon ilmalämpöpumpun käytöstä johtuvat lisääntyneet lämpöhäviöt. Lämpöhäviöt kasvavat, koska ilmalämpöpumpulla ajetaan korkeampaa sisälämpötilaa (>21 °C) ja koska huoneen lämpötilajakauma ei ole ideaalinen. Laskelmien perusteella hyötysuhde on luokkaa 0,86–0,91, joten ehdotus käytettäväksi arvoksi on 0,85.

2.1.5 Maksimituotto, $Q_{ILP,max}$

Ilmalämpöpumpun tuotto riippuu lämpöpumpun ominaisuuksista ja rakennuksen lämmöntarpeesta. Toisaalta SCOP riippuu tuotosta (osatehokuormituksesta), eli tuotto ja SCOP kulkevat "käsi kädessä". Yleisesti voidaan todeta, että mitä pienempi rakennuksen lämmöntarve on, sitä parempi on SCOP (ILP käy pienemmillä osatehoilla) ja päinvastoin: mitä suurempi rakennuksen lämmöntarve on, sitä huonompi on SCOP. Tästä syystä SCOP täytyy sitoa jollain tavoin tuottoon, ja yksinkertaisinta on tehdä se energiamerkinnän kautta.

Ilmalämpöpumpun maksimituotto lasketaan energiamerkinnän tiedoista seuraavasti:

- 1) Kylmälle ilmastolle ilmoitetuilla tiedoilla se voidaan laskea suoraan ilmoitetun SCOP-arvon ja ilmoitetun vuotuisen sähkönkulutuksen perusteella:

$$Q_{ILP,max} = SCOP * Q_{ILP,sähkö} \quad (5)$$



	2,8	2,8	4,0
kW	2,8	2,8	4,0
SCOP	6,1	5,1	4,0
kWh/annum	643	769	2100

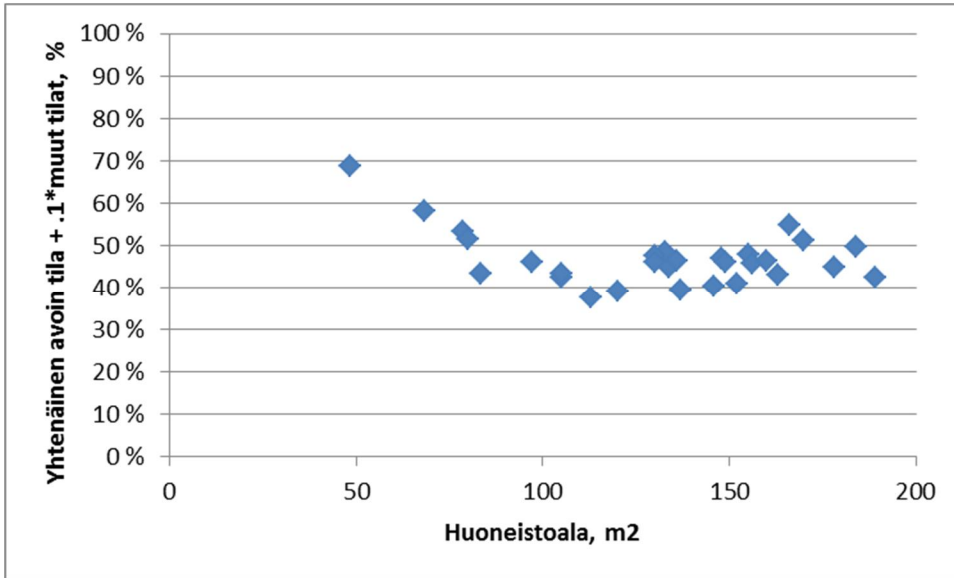
Kuva 3. Energiamerkinästä saadaan $Q_{ILP,max} = 4,0 * 2100 \text{ kWh/annum} = 8400 \text{ kWh/a}$.

- 2) Jos tiedot on ilmoitettu vain Keski-Euroopan olosuhteissa, maksimituotto on laskettavissa energiamerkinnän laskennan taustatiedoista, jos sellaiset on ilmoitettu.
- 3) Maksimituotto voidaan myös laskea käyttäen tarkempia laskelmia. Tällöin on määritettävä myös vastaava SCOP-arvo.
- 4) Jos maksimituottoa ei voida muutoin varmistaa, käytetään arvoa 1000 kWh/a.

2.2 Yksinkertaistettu menetelmä

Yksinkertaisimmillaan ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto voitaisiin määrittää prosenttiosuutena rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta. Maksimituotto voitaisiin rajoittaa energiamerkinnästä laskettaisiin arvoon, kuten edellä kappaleessa 2.1.5 esitettiin.

Erään pientalovalmistajan mallistosta määriteltiin laskennallisesti (kaava 3) yhtenäinen avoin tila, kuva 4. Kuten kuvasta havaitaan, laskettujen avoimien tilojen osuus huoneistoaloista on pääsääntöisesti suurempi kuin 40 %. Tällöin myös ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto voitaisiin määrittää 40 % osuutena koko rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon energiatarpeesta. Tämä on myös linjassa myöhemmin esitettävien simulointitulosten kanssa. Simulointien perusteella lähes nollaenergiarakennuksissa tuotto-osuus voi olla huomattavasti suurempikin kuin 40 %.



Kuva 4. Erään pientalovalmistajan esimerkkimalleista laskettujen yhtenäisten avoimien tilojen osuus koko pinta-alasta.

Ilma-ilmalämpöpumppu kykenee tuottamaan isossa tilassa energiamerkinnästä laskettavaa maksimituottoa huomattavasti suuremman lämpöenergiämäärän. Ongelmana on, että tuoton kasvaessa vuosilämpökerroin heikkenee eikä tätä suurempaa tuottoa vastaavaa lämpökerrointa voida määrittää ilman yksityiskohtaisia laskelmia.

Kun lämmöntuotto rajoitetaan energiamerkinnästä laskettavaan tuottoon, on perusteltua käyttää ilmalämpöpumpun ostoenergian (= lämpöpumpun sähkönkäyttö) laskennassa suoraan energiamerkinnässä kylmälle ilmastolle ilmoitettua SCOP-arvoa kerrottuna ilmalämpöpumpun kokonaishyötysuhteella, kaava 6:

$$Q_{ILP,sähkö} = \frac{Q_{ILP,netto}}{SCOP * \eta_{lämmönlouutus}} \quad (6)$$

jossa

- $Q_{ILP,sähkö}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen sähkönkäyttö
- $Q_{ILP,netto}$ on ilmalämpöpumpun vuotuinen nettotuotto
- SCOP on lämpöpumpun energiamerkinnästä saatava vuosilämpökerroin
- $\eta_{lämmönlouutus}$ on lämpöpumpun lämmönlouutuksen kokonaishyötysuhde

3. Ilma-ilmalämpöpumpujen lämmönluovutuksen hyötysuhde

3.1 Lämmöntuotto

Tässä tutkimuksessa oletetaan, että ilma-ilmalämpöpumppu toimii rakennuksessa lisälämmitysjärjestelmänä. Tällöin oletetaan, että rakennuksen varsinainen lämmitysjärjestelmä pitää yllä määräysten mukaista minimilämpötilaa eri tiloissa (+21 °C) ja ilma-ilmalämpöpumpulla ajetaan korkeampaa lämpötilatasoa (esimerkiksi +22 °C). Ilma-ilmalämpöpumpun lämmitysvaikutus on lähinnä tilakohtainen. Tilakohtainen lämmitys tarkoittaa, että lämpöpumppu yllilämpittää tilaa, johon se on asennettu, ja yllilämpö saa aikaan ilman tiheyseroista johtuvia ilmavirtauksia eri tilojen välillä, jolloin lämmitysvaikutus siirtyy myös muihin tiloihin. Eri tilojen väliseen lämmönsiirtoon vaikuttaa myös jossain määrin ilmalämpöpumpun sisäyksikön puhaltimen aikaansaama suunnattu puhallus. Puhalluksen vaikutusta lämmönsiirtoon ei tässä tutkimuksessa ole otettu huomioon. Tilojen yllilämpö aiheuttaa seinien, katon ja lattian johtumislämpöhäviöiden, vuotoilmanvaihdon ja ilmanvaihdon lämpöhäviöiden kasvua. Ilmanvaihdon lämpöhäviö riippuu poistoilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhteesta.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 mukaan ilma-ilmalämpöpumpun maksiminettotuotoksi on rajattu $Q_{\text{muu tuotto}} = 1000 \text{ kWh}$.

3.1.1 Kokonaishyötysuhteen määrittäminen simuloimalla

On selvää, että monimutkaisten fysikaalisten ilmiöiden selvittäminen edellyttää kehittyneiden simulointiohjelmien käyttöä. Siten voidaan mallintaa kaikki edellä kuvatut vaikutussuhteet.

Ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen hyötysuhteen määrittämiseksi ei ole standardeja, ja hyötysuhde täytyy määrittää tapauskohtaisesti erikseen. Lämmönluovutuksen hyötysuhteeseen vaikuttavat tarkasteltavan ilmalämpöpumpun lämmönluovutusominaisuudet sekä tarkasteltavan rakennuksen ominaisuudet. Ilmalämpöpumpun lämmönluovutusominaisuuksiin vaikuttaa ennen kaikkea lämmitystehon riippuvuus ulkolämpötilasta. Rakennuksen ominaisuuksista vaikuttavat tilojen massoittelu ja huoneen, johon ilmalämpöpumppu on asennettu, avoimuus rakennuksen muihin tiloihin nähden sekä ilmalämpöpumpun vaikutuspiiriin kuuluvien tilojen lämmöntarpeen suhde ilmalämpöpumpun lämmönluovutukseen.

Lämmönluovutuksen hyötysuhde sisältää ilmalämpöpumpun käytön aiheuttaman lämpötilanousun ja huoneen lämpötilakerrostuman aiheuttamat lisääntyneet johtumislämpöhäviöt vaipan kautta, kasvaneet vuotoilmahäviöt sekä muuttuneet ilmanvaihdon lämmitystarpeet. Poistoilman lämmön talteenotolla varustetussa rakennuksessa ilmalämpöpumpun käyttö pienentää tuloilman lämmitystarvetta.

Ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen hyötysuhde lasketaan kaavalla (7), joka on analoginen varsinaisten lämmönluovuttimien käsittelyn kanssa (Lämmitysjärjestelmät ja lämmin käyttövesi – laskentaopas 2011):

$$\eta_{\text{lämmönluovutus}} = \frac{1}{\frac{1}{\eta_{\text{lämmitys}}} + \frac{1}{\eta_{\text{kerrostuma}}} + \frac{1}{\eta_{\text{rakenne}}} - 2} \quad (7)$$

jossa

$\eta_{\text{lämmönluovutus}}$ on ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen hyötysuhde

$\eta_{\text{lämmitys}}$	ottaa huomioon huoneen lämpötilanousun aiheuttaman lämpöhäviön
$\eta_{\text{kerrostuma}}$	ottaa huomioon huoneilman pystysuuntaisen kerrostuman aiheuttaman lämpöhäviön
η_{rakenne}	ottaa huomioon rakennuksen vaipan läpi suoraan ulos suuntautuvat lämpöhäviöt.

Simulointiohjelmaa käyttäen ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen hyötysuhde määritetään alla olevan menettelyn mukaisesti. Laskenta voidaan tehdä joko niin, että lämmönjakojärjestelmä säätiminen on mukana, tai ilman lämmönjakojärjestelmää, jolloin säädön hyötysuhde on arvioitava erikseen. Siinä tapauksessa, että simulointiohjelma ei ota huomioon ilman lämpötilakerrostumista aiheutuvaa lisälämpöhäviötä, on tämä häviö otettava huomioon erikseen.

1. Lasketaan tarkasteltavan rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus halutulla jaksolla ilman ilmalämpöpumppua (Q_{ref}).
2. Mallinnetaan tarkasteltavan ilmalämpöpumpun ulkolämpötilasta riippuvat lämmönluovutusominaisuudet (ks. luku 4).
3. Sijoitetaan ilmalämpöpumppu haluttuun tilaan ja asetetaan sille ohjauslämpötilan taso, joka on korkeampi kuin varsinaisen lämmitysjärjestelmän asetusarvo ($> +21 \text{ }^\circ\text{C}$).
4. Lasketaan rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmönkulutus ilmalämpöpumppukäytöllä (Q_{ILP}).
5. Lasketaan lämmityksen hyötysuhde kaavalla

$$\eta_{\text{lämmitys}} = 1 - \frac{Q_{ILP, \text{rakennus}} - Q_{ref}}{Q_{ILP, \text{brutto}}} \quad (8)$$

jossa

$\eta_{\text{lämmitys}}$	on ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen hyötysuhde
Q_{ref}	on rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus ilman ilmalämpöpumppua, kWh/a
$Q_{ILP, \text{rakennus}}$	on rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus ilmalämpöpumpun kanssa, kWh/a
$Q_{ILP, \text{brutto}}$	on ilmalämpöpumpun rakennukseen tuoma lämpöenergia, kWh/a

Jos simulointiohjelma ei sisällä ilman lämpötilakerrostuman aiheuttamaa lisälämpöhäviötä, on lämpötilakerrostuman hyötysuhde huomioitava erikseen. Lämpötilakerrostuman hyötysuhteen määrittäminen on esitetty ympäristöministeriön oppaassa Lämmitysjärjestelmät ja lämmin käyttövesi – laskentaopas (2011).

Jos simulointi ei sisällä ilmalämpöpumpun sijoituksen aiheuttamaa mahdollista lisälämpöhäviötä suoraan ulkoilmaan (esimerkiksi poikkeuksellisen pitkät putkivedot ulkona ulko- ja sisäyksikön välillä), on tämä otettava huomioon erikseen.

3.1.2 Lämpöolosuhteet

Laskennassa on pidettävä huoli siitä, että lämpöolosuhteet eivät nouse liian korkeiksi tilassa, johon ilmalämpöpumppu on sijoitettu. Lämpötilan nousu johtuu siitä, että ilmalämpöpumpun lämmöntuotto on suurempi kuin tilan lämmöntarve, jolloin huonelämpötila nousee, vaikka lämmityksen säätöjärjestelmä sulkee tilan lämmityksen. Tämä rajoittaa ilmalämpöpumpun asetuslämpötilaa ja myös tulisijalla tuotettavaa nettolämmitysenergiaa. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa sanotaan: huoneilman lämpötila ei saa kohota yli $26 \text{ }^\circ\text{C}$, ellei lämpötilan kohoaminen johdu ulkoilman lämpimyydestä. Lämmityskaudella huoneilman lämpötilan ei tulisi ylittää $23\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$. Tätä voidaan tulkita siten, että hetkellisesti lämpötilan on sallittua kohota lämmityskaudella $+26 \text{ }^\circ\text{C}$:seen, mutta pidemmän jakson keskilämpötilan tulee jäädä alle $+24 \text{ }^\circ\text{C}$:n.

3.1.3 Ääniolosuhteet

Uusien asuinrakennusten ääniolosuhteista määrätään Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C1. Määräyksen mukaan LVIS-laitteiden tai niihin rinnastettavissa olevien laitteiden aiheuttama suurin sallittu äänitaso ($L_{A,eq,T}$) muissa asuinhuoneissa kuin keittiössä on 28 dB. Tästä syystä simuloinneissa ilmalämpöpumppujen ominaisuudet on määritetty sisäyksikön vakiopuhallusteholla, jolla valmistajan ilmoittama äänitaso jää alle vaatimuksen.

4. Käytetyt menetelmät ja laskentatapausten reunaehdot

Ilma-ilmalämpöpumpuilla on toisistaan poikkeavia lämmitysominaisuuksia erityisesti niiden energiatehokkuus- ja lämmitysteho-ominaisuuksien mukaan. Erilaisten ominaisuuksien vaikutusten arvioimiseksi tässä projektissa on analysoitu kahden lämmöntuotto- ja energiatehokkuusominaisuuksiltaan erilaisen ilmalämpöpumpun käyttäytymistä erilaisissa lämmitys- ja käyttöolosuhteissa. Erilaisten ilmalämpöpumppujen vaikutuksia lämmitystehokkuuteen ja lämmityshyötysuhteisiin on arvioitu korjaus- ja uudisrakennuksissa. Korjaus- ja uudisrakennuksiksi on valittu tulosten yleisen vertailtavuuden parantamiseksi aikaisemmin Costoptimal-projektissa (Energiatehokkuutta) määritetyt kohteet, ja molemmissa rakennuksissa on analysoitu ilmalämpöpumppujen käyttäytymistä kahdella eri energiatehokkuustasolla: perustaso ja energiatehokas rakennus. Tehdyissä simuloinneissa on käytetty Helsingin säätietoja, joita käytetään yleisesti rakennusten energiatehokkuuden kelpoisuuden osoittamisessa (Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3, 2012). Sääolosuhteiden vaikutusta ilmalämpöpumpun ominaisuuksiin on lisäksi herkisteltä Sodankylän säätiedoilla.

4.1 Laskentatyökalu

Tässä projektissa tehdyissä analyyseissä on käytetty IDA-ICE 4.7 (beta-versio)-rakennusten simulointiohjelmistoa. Tämä laskentasovellus huomioi eri lämmönsiirtomekanismit (konvektio, johtuminen ja säteily), ja se ratkaisee aikariippuvat massa-, liikemäärä- ja energiataseet.

Laskennassa on hyödynnetty ohjelmiston sisältämää ilma-ilmalämpöpumpun mallia. Mallia on kuitenkin muutettu niin, että lauhduttimen ja höyrystimen ilmavirrat voidaan vakioida.

4.2 Ilmalämpöpumput

Laskennassa käytettyjen ilmalämpöpumppujen ominaisuudet perustuvat kahden eri tahon julkaisemiin mittaustietoihin. Ilmalämpöpumppujen julkisia mittaustietoja löytyy toisaalta ruotsalaiselta Energimyndighetenin sivustolta¹ ja toisaalta suomalaisen toimijan, Scanoffice Oy:n, sivustolta².

Eri lähteissä julkaistut mittaukset poikkeavat toisistaan mittaolosuhteiden suhteen. Ruotsalaiset mittaukset on tehty suurimmalla teholla ja suurimmilla puhallinnopeuksilla sekä lisäksi muutamassa osakuormitusolosuhteessa. Ruotsalaiset mittaustulokset kattavat ulkolämpötilaolosuhteet +7...-15 °C. Suomalaiset mittaukset on tehty olosuhteissa, jotka jäljittelevät ilmalämpöpumppujen käyttöä todellisissa olosuhteissa, ja sisäyksikön puhallinteho on asetettu vakioksi (keskimäinen asetusarvo). Suomalaiset mittaukset kattavat ulkolämpötilaolosuhteet +10...-30 °C. Suomalaiset mittaukset on tehty siten, että testaushuoneen lämpötehontarve muuttuu ulkolämpötilaolosuhteiden mukaan lineaarisesti (0...6 kW) jäljitellen todellista käyttäytymistä.

Mittaustietojen käyttämisessä tässä hankkeessa on kummassakin omat puutteensa. Ruotsalaiset mittaukset kattavat vain osan tarvittavasta ulkolämpötila-alueesta, ja osakuormitusmittaukset on tehty vain kolmessa eri olosuhteessa (75 % osakuormitus ulkolämpötiloilla +2 °C ja +7 °C ja 50 % osakuormituksella ulkolämpötilalla +7 °C). Lisäksi ruotsalaiset mittaukset on tehty sisäyksikön täydellä ilmavirralla, jolla määräysten suurin sallittu äänitaso (28 dB) ylittyy selvästi. Suomalaisissa mittauksissa ulkolämpötilaolosuhteet

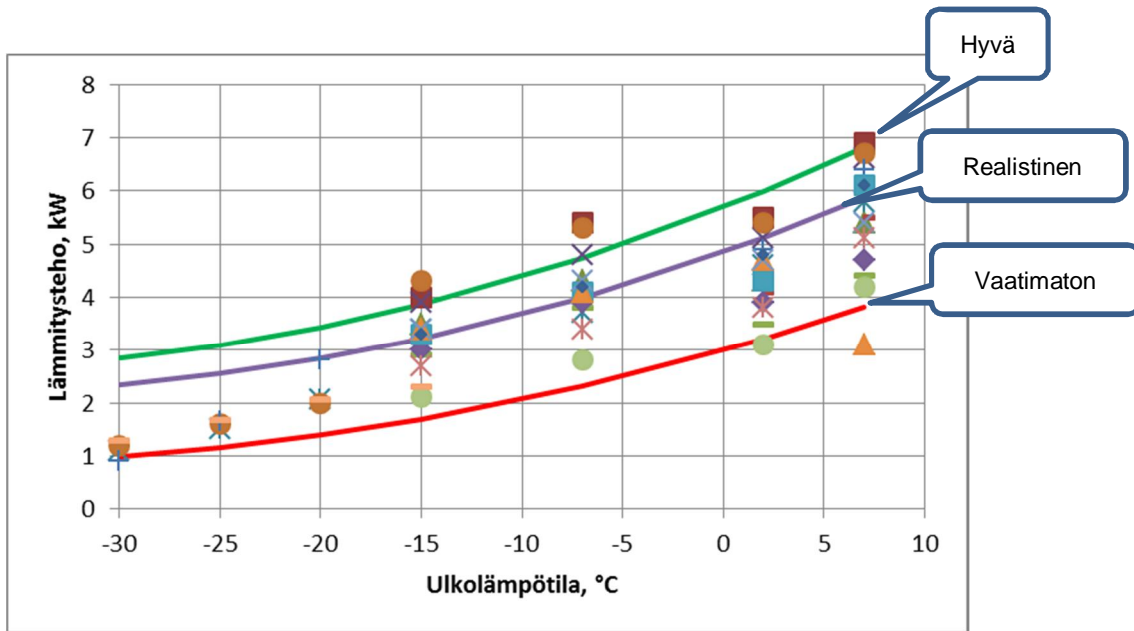
¹ (<http://www.energimyndigheten.se/Hushall/Testerresultat/Testresultat/Luftluftvarmepumpar-2013-2009/>)

² (<http://www.scanoffice.fi/fi/tuotteet/tuoteryhmat/ilmalampopumput/raportit-ja-sertifikaatit/vtn-testiraportit/>).

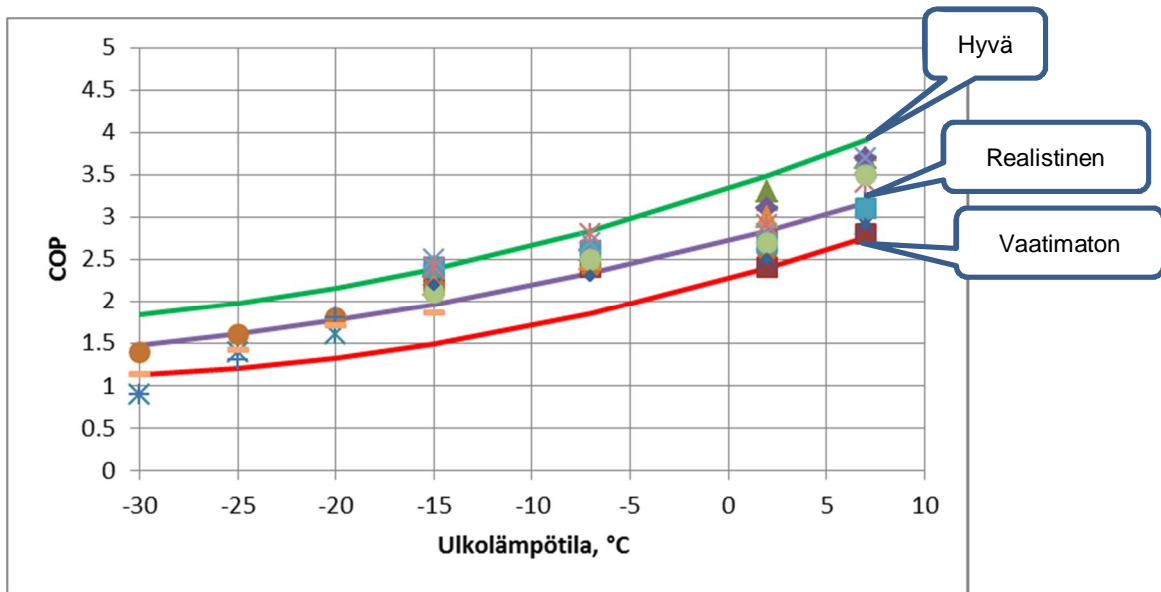
vaihtelevat riittävästi ja sisäyksikön ilmavirta on asetettu manuaalisesti keskimmaiseen asentoon, jolla äänimääryysten toteutuminen on hyvin lähellä. Epäkohtana suomalaisissa mittauksissa on osakuormitusolosuhteet, jotka ovat eritehoisille ilmalämpöpumpuille erilaiset. Lisäksi tarkan osatehosuhteen määrittäminen edellyttäisi tietoa täyden tehon tuotosta kussakin ulkolämpötilaolosuhteessa, mutta sitä ei ole mitattu.

4.2.1 Ilma-ilmalämpöpumppujen simulointimallit

Ilmalämpöpumppujen mallinnukseen valittiin kolme erityyppistä lämpöpumppua: 1) suuri lämmitysteho ja hyvä COP, 2) vaatimaton lämmitysteho ja vaatimaton COP ja 3) realistinen lämmitysteho ja realistinen COP. Ominaisuuksien valinta perustui ruotsalaisen Energimyndighetenin ja suomalaisen Scanoffice Oy:n verkkosivuillaan julkistamiin mittaustuloksiin. Sulatuksen vaikutus lämmitystehtoon ja COP-arvoihin sisältyi mitattuihin arvoihin. Täydellä kuormituksella julkaistut mittaustulokset ja valittujen mallien tuottoarvot on esitetty kuvissa 5 ja 6.

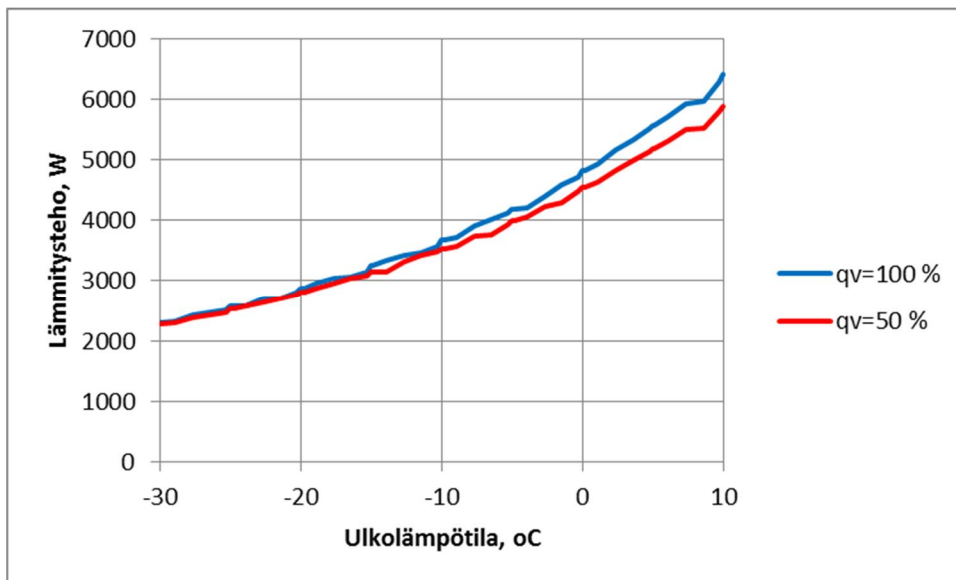


Kuva 5. Simuloinneissa käytetyt ilma-ilmalämpöpumppujen lämmitystehot täydellä kuormituksella ulkoilman lämpötilan funktiona. Energimyndighetenin ja Scanoffice Oy:n julkaisemien ilmalämpöpumppujen mittaustulokset on esitetty kuvassa pisteinä. Sulatuksen sähköenergia sisältyi mitattuihin arvoihin.

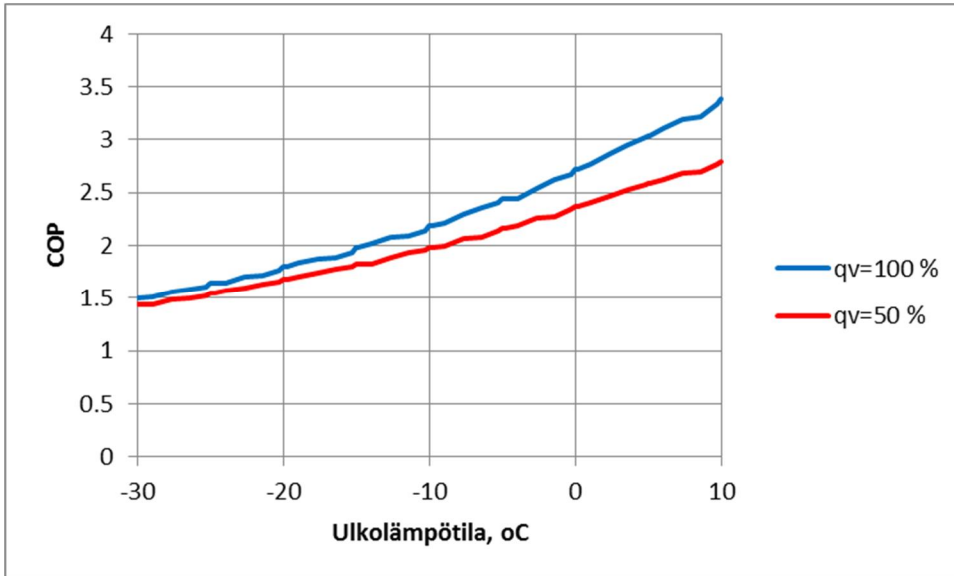


Kuva 6. Simuloinneissa käytetyt ilma-ilmalämpöpumppujen COP-arvot täydellä kuormituksella ulkoilman lämpötilan funktiona. Energimyndighetenin ja Scanoffice Oy:n julkaisemien ilma-ilmalämpöpumppujen mittaus tulokset on esitetty kuvassa pisteinä. Sulatuksen sähköenergia sisältyy mitattuihin COP-arvoihin.

Uudisrakennuksessa ilmalämpöpumpun äänitaso sisällä huoneistossa ei saa ylittää rakentamismääräysten (Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C1) korkeinta sallittua arvoa 28 dBA. Tästä syystä mallintamisessa jouduttiin rajoittamaan sisäyksikön ilmavirta 50 %:iin täydestä ilmavirrasta. Ilmavirran rajoittaminen vaikuttaa myös ilmalämpöpumpun tuottoarvoihin, mistä esimerkkinä on kuvissa 7 ja 8 esitetty simulointimallilla lasketut vaikutukset realistisen mallin lämmöntuottoon ja COP-arvoihin.

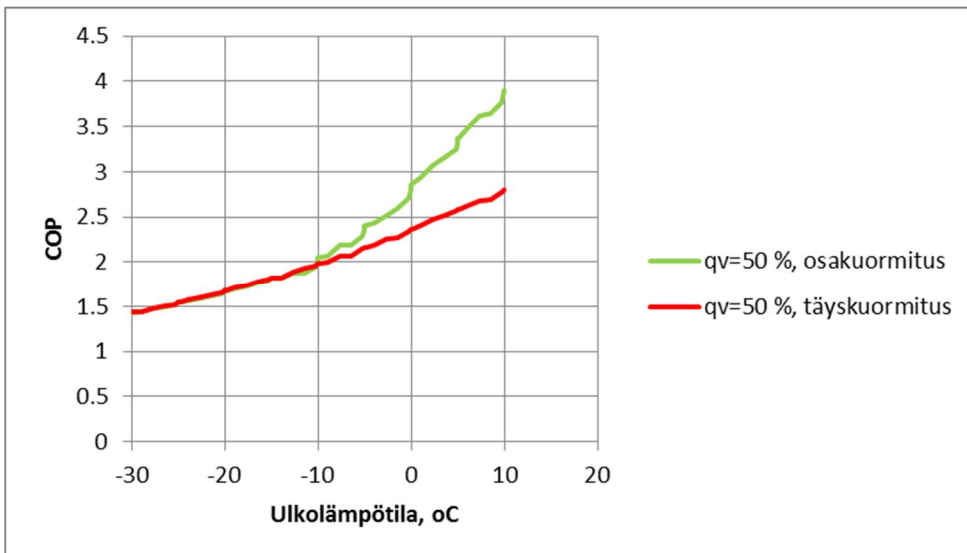


Kuva 7. Simuloinneissa käytetyn realistisen ilma-ilmalämpöpumpun lämmitystehot sisäyksikön 100 %:n ja 50 %:n ilmavirtauksilla.



Kuva 8. Simuloinneissa käytetyn realistisen ilma-ilmalämpöpumpun COP-arvot sisäyksikön 100 %:n ja 50 %:n ilmavirtauksilla.

Ilma-ilmalämpöpumput toimivat osan lämmityskautta osakuormitustilanteessa, jolloin COP-arvot paranevat huomattavasti verrattuna täyteen kuormitustilanteeseen. Tätä on havainnollistettu kuvassa 9. Ilmiö johtuu siitä, että osakuormituksella lauhtuslämpötila laskee ja höyrystyslämpötila nousee verrattuna täyden kuorman tilanteeseen. Lämpöpumpun COP riippuu voimakkaasti lauhtumis- ja höyrystyslämpötiloista, mikä näkyy myös simulointimallissa.

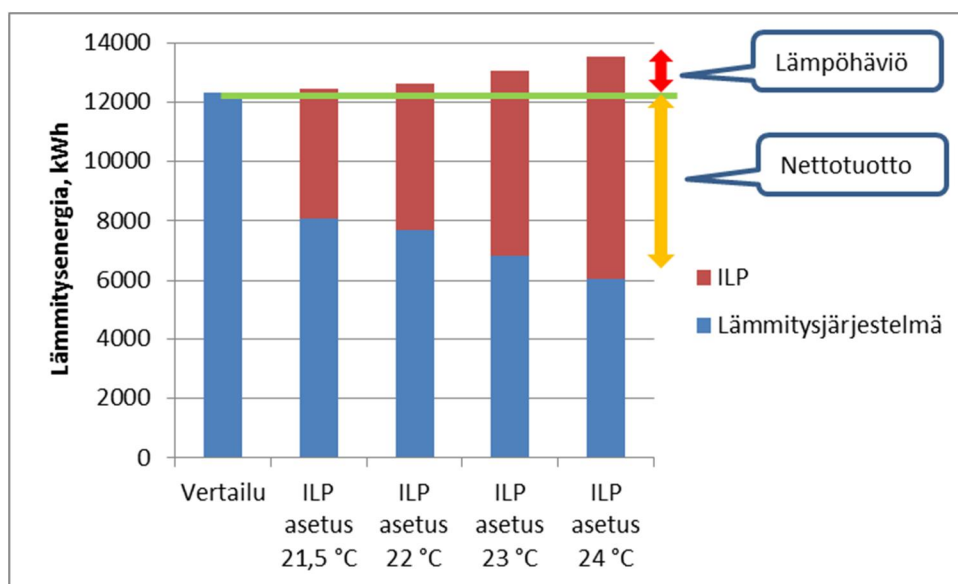


Kuva 9. Simuloinneissa käytetyn realistisen ilma-ilmalämpöpumpun COP-arvot sisäyksikön 50 %:n ilmavirtauksella täydellä kuormituksella sekä osakuormituksella. Simuloitu osakuormitustilanne vastaa realistista tilannetta, jossa kylmällä jaksolla ($T_{\text{ulkolämpötila}} < -10 \text{ °C}$) lämpöpumppu käy täydellä teholla ja lämpimällä jaksolla osakuormitussuhde kasvaa ulkolämpötilan noustessa, kun lämpöpumpun lämmitystehontuotto kasvaa ja toisaalta lämmöntarve pienenee.

4.2.1.1 Nettolämmöntuoton ja ostoenergian sekä uusiutuvan energian määrittely

Nettolämmöntuotto ($Q_{ILP,netto}$) on määritelty seuraavasti: ilma-ilmalämpöpumpun bruttolämmöntuotosta on vähennetty rakennuksen lämpöhäviöt, jotka johtuvat ilma-ilmalämpöpumpun vertailutilannetta korkeammasta huonelämpötilasta, kuva 10. Korkeampi huonelämpötila johtuu siitä, että simuloinneissa päälämmitysjärjestelmä (sähköpatterit) pitää huonetilojen lämpötilan vähintään määräystenmukaisessa lämpötilassa +21 °C:ssa ja ilmalämpöpumpun asetuslämpötila pidetään korkeampana kuin tämä peruslämpötila. Simuloinnit on tehty useammalla ilmalämpöpumpun asetusarvolla.

Rakennuksen lämpöhäviöiden vertailukohtana on lämmönkulutus (tilojen + ilmanvaihdon lämmitys) ilman ilma-ilmalämpöpumpua. Ilma-ilmalämpöpumpulla varustetun rakennuksen lämmönkulutus on lämmitysjärjestelmän lämmöntuotto (tilojen + ilmanvaihdon lämmitys) lisättyä lämpöpumpun lämmöntuotolla. Lämpöhäviöt johtuvat ilmalämpöpumpputapauksissa korkeammasta sisälämpötilasta, joka kasvattaa johtumis- ja vuotoilmahäviöitä.



Kuva 10. Ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto ja lämpöhäviöt ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

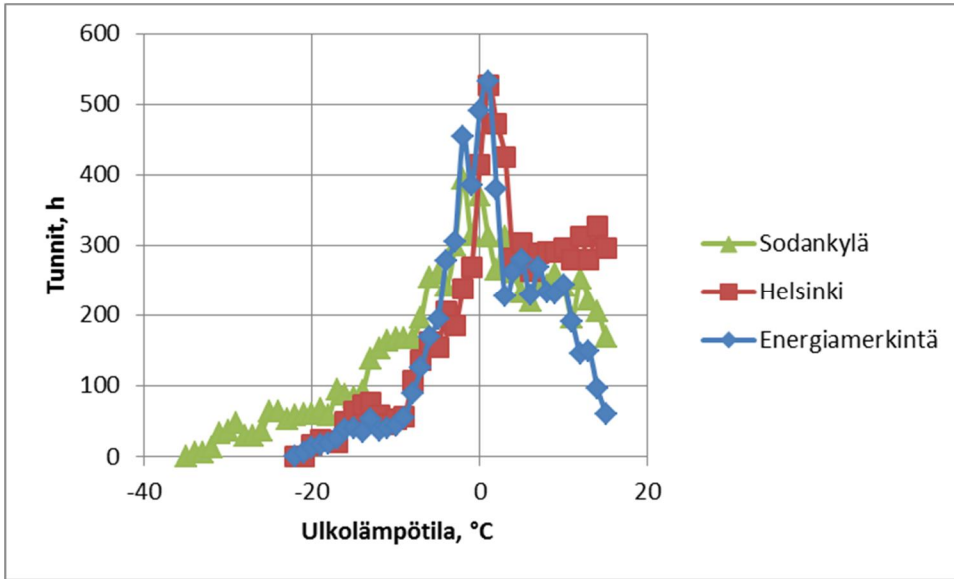
Ostoenergian säästö määritellään ilma-ilmalämpöpumpun nettotuoton ($Q_{ILP,netto}$) ja lämpöpumpun käyttämän sähköenergian kulutuksen ($Q_{ILP,sähkö}$) erotuksena, kaava 9. Ilmalämpöpumpun sähkökulutuksessa täytyy ottaa huomioon lämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde (kaava 7). Ostoenergian säästö on myös yhtä suuri kuin lämpöpumpun uusiutuvan energian nettokäyttö ($Q_{ILP,uusiutuva}$).

$$Q_{ILP,säästö} = Q_{ILP,uusiutuva} = Q_{ILP,netto} - Q_{ILP,sähkö} \quad (9)$$

4.3 Säätiöt

Säätiötietoja simuloinneissa käytettiin ympäristöministeriön julkaisemia (<http://www.ym.fi>), rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergiankulutuksen laskentaa varten kehitettyjä, nykyistä ilmastoa vastaavan testivuoden tuntikohtaisia tietoja. Simuloinnit tehtiin pääasiassa Helsingin säätiödoilla mutta joitain laskelmia herkisteltiin myös Sodankylän säätiödoilla. Säätiödoista määritetyt tuntipysyvyydet on esitetty kuvassa 11,

jossa on vertailun vuoksi esitetty myös ilma-ilmalämpöpumppujen energiamerkinnässä kylmälle säävyöhykkeelle käytettävä säätietä (Commission delegated regulation (EU) No 626/2011).



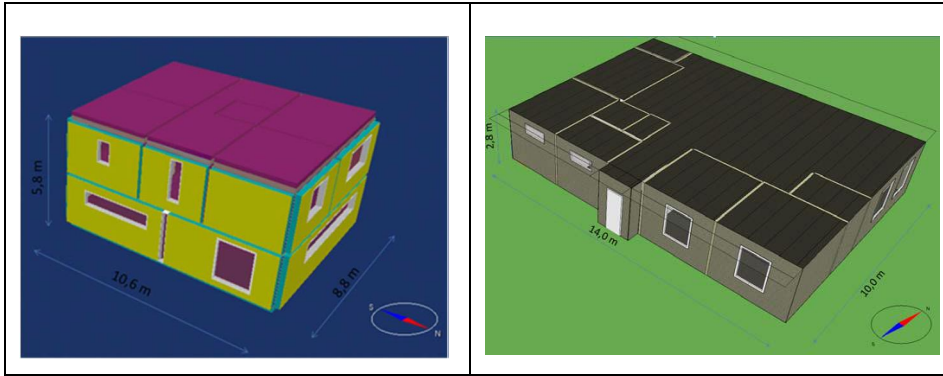
Kuva 11. Simuloinneissa käytetyt säädät Sodankylälle ja Helsingille. Vertailun vuoksi on esitetty myös energiamerkinnässä käytettävä kylmän ilmaston säädätä.

Sodankylän sää on selvästi Helsingin ja energiamerkinnän säitä kylmempi. Energiamerkinnän kylmälle säävyöhykkeelle käytettävä sää on hieman Helsingin säätä kylmempi ja soveltuu siten hyvin ilma-ilmalämpöpumppujen vertailuun Suomen olosuhteissa.

4.4 Rakennukset

Dynaamiset tuntitaso simuloinnit on tehty kahdella erilaisella rakennusmallilla (kuva 12). Uudisrakennusta simuloitiin kaksikerroksisena erillisenä pientalona. Uudisrakennuksen simuloinnissa rakennuksen energiatehokkuuden suhteen tehtiin kaksi erilaista tapausta: nykynormien mukainen rakennus ja erittäin energiatehokas rakennus, jonka energiatehokkuus on hyvin lähellä passiivitasoa ja tulevaisuuden lähes nolla-energiaratkaisua. Uudisrakennuksen lämpöteknistä toimintaa simuloitiin Helsingin sääoloissa ja tulosten herkkyytarkastelun vuoksi Sodankylän sääoloissa.

Korjauskohteen simuloinnissa käytettiin yksikerroksista erillisen pientalon mallia. Korjauskohteen simuloinnit tehtiin uudisrakennuksen tapaan luoden kaksi erilaista tapausta: alkuperäinen rakennus ja rakennus, johon tehdään energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä.



Kuva 12. Analyseissä käytetyt rakennukset: vasemmalla uudisrakennus- ja oikealla korjausrakennuskohde.

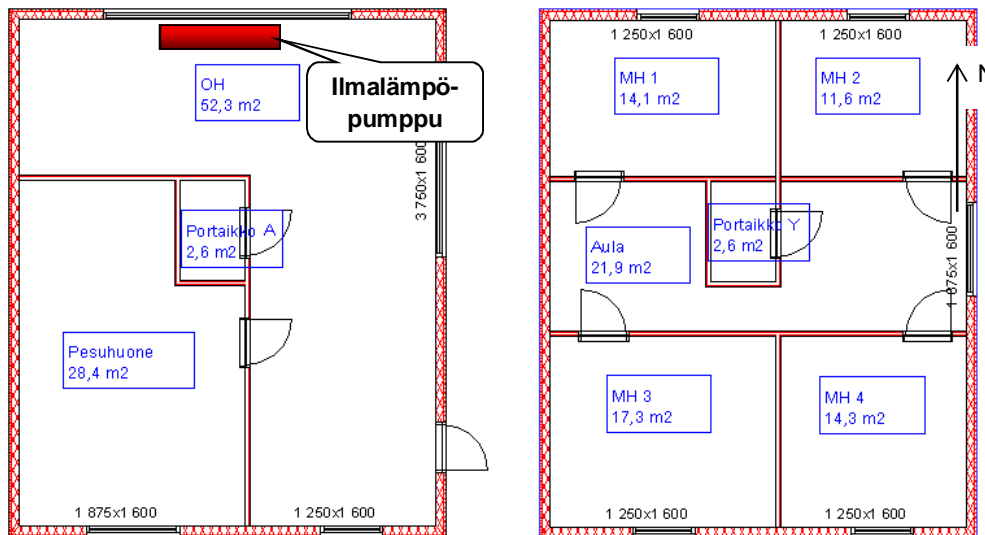
Simuloinnin lähtöoletukset ja simuloinnissa käytetyt rakennukset on kuvattu luvuissa 4.4.1 ja 4.4.2. Molemmissa rakennuksissa on oletettu asuvan nelihenkinen perhe, kaksi aikuista ja kaksi lasta.

Simuloinneissa kaikkien makuuhuoneiden ovet ja kaksikerroksisessa rakennuksessa myös portaikon ovet on pidetty avoinna. Sen sijaan vessojen, kylpyhuoneiden ja vaatehuoneiden ovet on pidetty laskennassa kiinni. Ilmalämpöpumppujen lämmön leviäminen rakennuksissa on esitetty esimerkein liitteessä D.

Simuloituja laskentatapauksia oli yhteensä 128. Valtaosa laskentatapauksista koostui lämmitysteholtaan ja energiatehokkuustasoltaan erilaisista ilmalämpöpumpuista sekä käytetyn asetuslämpötilan ja rakennuksen energiatehokkuustason variaatioista. Kunkin rakennuksen lämpöteknistä käyttäytymistä simuloitiin myös ilman ilmalämpöpumppua. Lisäksi suoritettiin herkkyystarkastelu simuloimalla muutamaa laskentatapauksia Sodankylän sääolosuhteissa.

4.4.1 Erillinen pientalo, uudisrakennus

Uudisrakennuksen mallina käytettiin kaksikerroksisen erillisen pientalon mallia, jonka pohjapiirustus on esitetty kuvassa 13. Ilmalämpöpumppu on sijoitettu mahdollisimman avoimeen tilaan, joka tässä tapauksessa on olohuone.



Kuva 13. Kaksikerroksisen tyypipientalon pohjapiirustus ja ilmalämpöpumpun sijoitus.

Rakennuksen tärkeimmät laajuustiedot on esitetty seuraavissa taulukoissa (Taulukko 1 ja Taulukko 2).

Taulukko 1. Tyypipientalon keskeisimmät laajuustiedot.

Rakennustilavuus	468 m ³
Lattiapinta-ala	165,2 m ²
Ulkovaipan pinta-ala	363 m ²

Taulukko 2. Tyypipientalon rakenneosien pinta-ala suuntauksittain.

Ilmansuunta	Ulkoseinä m ²	Ikkuna m ²	Ulko-ovi m ²
Pohjoinen	32,4	12,0	-
Länsi	53,4	0,0	-
Etelä	35,4	9,0	-
Itä	44,4	9,0	2,2
Yhteensä	165,6	30,0	2,2

Muiden rakenteiden laajuudet ovat seuraavat:

- yläpohjan pinta-ala 81,9 m²
- alapohjan pinta-ala 83,3 m²
- väliseinien pinta-ala 105,2 m²
- väliovien pinta-ala yhteensä 14,6 m².

Seuraavassa taulukossa (Taulukko 3) esitetään tyypipientalon simuloinnissa käytettyjen rakenteiden U-arvot sekä normitapaukselle että erittäin energiatehokkaalle rakennukselle. Tyypipientalo on varustettu koneellisella tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmällä, jossa on poistoilman lämmöntalteenotto (LTO). LTO:n vuosihyötysuhteen oletettiin normitasolla olevan 45 % ja passiivitasolla 80 %. Simuloinnissa on oletettu, että keittiön ilmavirtoja voidaan tehostaa erillisellä liesituulettimella. Liesituulettimen poistoilma johdetaan suoraan katolle eikä siitä siis oteta lämpöä talteen. Huonekohtaiset tulo- ja poistoilmavirrat esitetään alla olevassa taulukossa (

Taulukko 4).

Taulukko 3. Rakenteiden U-arvot.

Rakennusosa	U-arvo, W/m ² K	
	Normitaso	Erittäin energiatehokas
Ulkoseinä	0,17	0,08
Yläpohja	0,09	0,05
Alapohja	0,16	0,10
Ikkunat	1,0	0,8
Ulko-ovet	1,0	0,8

Taulukko 4. Ilmanvaihdon ilmavirrat. Käyntiaika jatkuva 24 h/vrk ja 7 vrk/vko.

Tila	Tuloilmavirta dm ³ /s	Poistoilmavirta dm ³ /s	Tehostus dm ³ /s
OH	26	-	25 *)
PH	-	33	-
Portaikko	2	7	-
MH1	7	-	-
MH2	6	-	-
MH3	9	-	-
MH4	7	-	-
Aula	9	29	-
Yhteensä	66	69	

*) Käyntiaika 2 h/vrk

4.4.1.1 Rakennuksen lämmitysenergian tarve

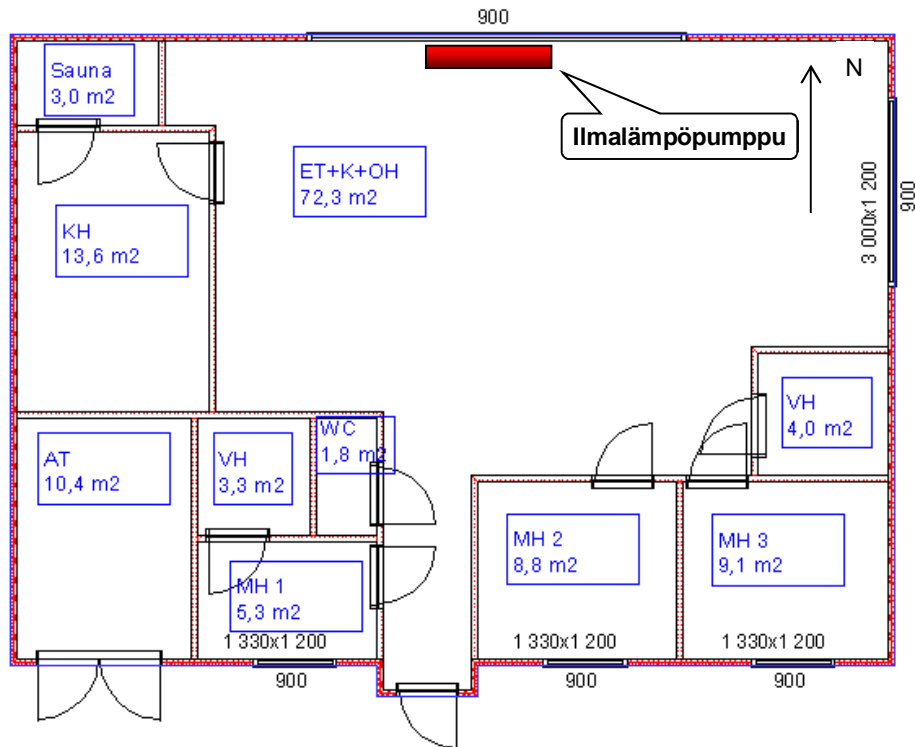
Dynaamisen vuosisimuloinnin tuloksena saatu tilojen kuukausittainen lämmitysenergiankulutus eri laskentatapauksille ilman ilmalämpöpumppua on esitetty seuraavassa taulukossa, Taulukko 5.

Taulukko 5. Pientaloesimerkin kuukausittaiset tilojen lämmitysenergian nettotarpeet ilman ilmalämpöpumppua.

Kuukausi	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve, kWh		
	Normitaso, Helsinki	Erittäin energiatehokas, Helsinki	Erittäin energiatehokas, Sodankylä
Tammi	2244	1 127	1620
Helmi	2009	975	1397
Maalis	1879	463	1072
Huhti	961	149	528
Touko	289	53	250
Kesä	76	0	15
Heinä	4	0	0
Elo	28	0	23
Syys	332	0	179
Loka	977	313	698
Marras	1635	596	1146
Joulu	2031	907	1426
Vuosi	12467	4 583	8352

4.4.2 Erillinen pientalo, korjauskohde

Korjauskohteen mallina käytettiin yksikerroksisen erillisen pientalon mallia, jonka pohjapiirustus on esitetty kuvassa 14. Ilmalämpöpumppu on sijoitettu mahdollisimman avoimeen tilaan, joka tässä tapauksessa on olohuone.



Kuva 14. Yksikerroksisen tyypipiENTALON pohjapiirustus ja ilmalämpöpumpun sijoitus.

Rakennuksen tärkeimmät laajuustiedot on esitetty alla, ks. Taulukko 6 ja Taulukko 7.

Taulukko 6. TyypipiENTALON keskeisimmät laajuustiedot.

Rakennustilavuus	352 m ³
Lattiapinta-ala	132 m ²
Ulkovaipan pinta-ala	392 m ²

Taulukko 7. TyypipiENTALON rakenneosien pinta-ala suuntauksittain. Pinta-alat on laskettu kokonais-sisämitoilla.

Ilmansuunta	Ulkoseinä m ²	Ikkuna m ²	Ulko-ovi m ²
Pohjoinen	45,9	7,2	-
Länsi	33,9	0,0	-
Etelä	48,3	4,8	6,9
Itä	37,5	3,6	-
Yhteensä	165,6	15,6	6,9

Muiden rakenteiden laajuudet ovat seuraavat:

- Ylä- ja alapohjan pinta-alat sama kuin lattiapinta-ala eli 132 m².
- Väliseinien pinta-ala 97,0 m².
- Väliovien pinta-ala on yhteensä 16,8 m².

Taulukossa 8 esitetään tyypipiENTALON simuloinnissa käytettyjen rakenteiden U-arvot sekä normitapaukselle (korjaamaton) että energiatehokkaalle (korjattu) rakennukselle.

Taulukko 8. Rakenteiden U-arvot.

Rakennusosa	U-arvo W/m ² K	
	Korjaamaton	Korjattu
Ulkoseinä	0,50	0,17
Yläpohja	0,27	0,09
Alapohja	0,38	0,38
Ikkunat	2,5	2,5
Ulko-ovet	1,1	1,1

Ilmanvaihtoratkaisuna alkuperäisessä sekä korjatussa tyyppientalomallissa on koneellinen poistoilmanvaihto. Alkuperäistä yksikerroksista tyyppientaloa on laskennassa oletettu korjattavan vain ulkovaipan lämmöneristävyyden osalta. Ilmanpitävyyden on oletettu paranevan korjaamattoman rakennuksen arvosta 6 (m³/(h m²)) arvoon 2 (m³/(h m²)).

Huonekohtaiset tulo- ja poistoilmavirrat esitetään taulukossa 9. Simuloinnissa on oletettu, että keittiön ilmavirtoja voidaan tehostaa erillisellä liesituulettimella.

Taulukko 9. Ilmanvaihdon ilmavirrat. Käyntiaika jatkuva 24 h/vrk ja 7 vrk/vko.

Tila	Tuloilmavirta dm ³ /s	Poistoilmavirta dm ³ /s	Tehostus dm ³ /s
AT	-	3	-
ET+K+OH	-	7	25 *)
KH	-	10	-
MH1	-	3	-
MH2	-	3	-
MH3	-	3	-
Sauna	-	10	-
WC	-	7	-
VH 3,3 m ²	-	3	-
VH 4,0 m ²	-	3	-
Yhteensä		52	

*) Käyntiaika 2 h/vrk

4.4.2.1 Rakennuksen lämmitysenergian tarve

Esimerkkientalon tilojen kuukausittainen lämmitysenergiankulutus eri laskentatapauksille ilman ilmalämpöpumppua on esitetty taulukossa 10. Simuloinnissa rakennuksen lämmitysjärjestelmän oletettiin olevan suora sähkölämmitys, joka on varustettu tarkalla elektronisella huonekohtaisella lämpötilansäädöllä.

Taulukko 10. Pientaloesimerkin kuukausittaiset tilojen lämmitysenergian nettotarpeet ilman ilmalämpöpumppua.

Kuukausi	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiatarve, kWh	
	Alkuperäinen	Korjattu
Tammi	4 224	2 560
Helmi	3 759	2 291
Maalis	3 589	2 194
Huhti	2 095	1 296
Touko	991	609
Kesä	421	229
Heinä	85	27
Elo	298	117
Syys	1 019	523
Loka	2 165	1 228
Marras	3 211	1 893
Joulu	3 866	2 316
Vuosi	25 723	15 282

4.5 Muut laskennassa käytetyt reunaehdot

Ilmalämpöpumpun vuotuinen käyttöaika määriteltiin siten, että lämmityskauden ulkopuolella ajanjaksolla 1.6.–31.8. lämpöpumppua ei käytetä. Simuloinneissa ilmalämpöpumpun sisäyksikön (lauhdutin) ilmavirta pidettiin vakiona. Ilmavirta valittiin siten, että sisäyksikön äänitaso jää alle rakentamismääräysten vaatimustason (äänitaso $L_{A,eq,T} < 28$ dB). Käytännössä tämä tarkoitti sisäyksikön ilmavirtauksen puolittamista (puhaltimen keskimäinen asento). Simuloinnit tehtiin jokaiselle tapaukselle käyttäen neljää ilmalämpöpumpun asetustilaa: 21,5 °C, 22 °C, 23 °C ja 24 °C.

5. Tulokset

Laskennalliset tarkastelut suoritettiin erilaisen lämmönkulutustason ja erilaisen massoitellun omaaville pientaloille: kaksikerroksinen ja yksikerroksinen rakennus. Kaksikerroksinen rakennus edustaa uutta rakennuskantaa ja yksikerroksinen vanhaa rakennuskantaa. Kummastakin rakennuksesta analysoinneissa käytettiin vielä kahden eri lämmönkulutustason versioita: Kaksikerroksisessa rakennuksessa käytettiin toisessa ratkaisussa nykymääräysten (2013) mukaisia rakenteita ja toisessa ratkaisussa passiivitaso rakenteita. Yksikerroksisessa rakennuksessa käytettiin toisessa ratkaisussa alkuperäisiä rakenteiden lämmöneristävyksiä, jolloin tilojen lämmöntarve oli erityisen suuri, ja toisessa ratkaisussa peruskorjatun rakennuksen lämmöneristävyksiä, jolloin lämmöntarve oli huomattavasti pienempi.

Rakennukset poikkesivat merkittävästi toisistaan paitsi tilojen lämmöntarpeen, myös pohjaratkaisun suhteen. Kaksikerroksisen rakennuksen pohjaratkaisu on ilmalämpöpumpun kannalta paljon suljetumpi, ja tulisijan lämpö leviää ensisijaisesti huomattavasti pienemmälle alueelle kuin yksikerroksisessa rakennuksessa. Yksikerroksisen rakennuksen pohja-ratkaisu on varsin avara, jolloin ilmalämpöpumpun lämpö pääsee helposti leviämään sangen laajalle alueelle.

Ilmalämpöpumppuina rakennuksissa käytettiin kaikkia kolmea eri tyyppiä: 1) erittäin tehokas ja energia-tehokas, 2) pienitehoinen ja vaatimaton energiatehokkuus ja 3) realistinen, hyvää tasoa edustava. Lämpöpumppujen ominaiskäyrät (teho ja lämpökerroin) on esitetty kohdassa 4.2. Ilmalämpöpumppuja säädettiin huonelämpötilan perusteella ja asetusarvoina käytettiin neljää eri asetusarvoa: 21,5 °C, 22 °C, 23 °C ja 24 °C.

Simuloinnit suoritettiin lisäksi Sodankylän säässä. Näillä laskelmilla haluttiin selvittää säävyöhykkeen vaikutusta ilmalämpöpumpun käyttöön.

Seuraavassa esitetään tulokset rakennuksittain tiivistetysti; yksityiskohtaisemmat tulokset on esitetty liitteissä.

Ilmalämpöpumppujen nettolämmöntuotot on laskettu seuraavasti: vertailukohtana on rakennuksen lämmitysenergian kulutus (tilojen lämmitys + ilmanvaihdon LTO:n jälkeinen lämmitys) ilman ilmalämpöpumppua, mistä ilmalämpöpumpun nettotuotto on saatu vähentämällä lämmitysenergiankulutus kulloisellakin ilmalämpöpumpun laskentatapauksella.

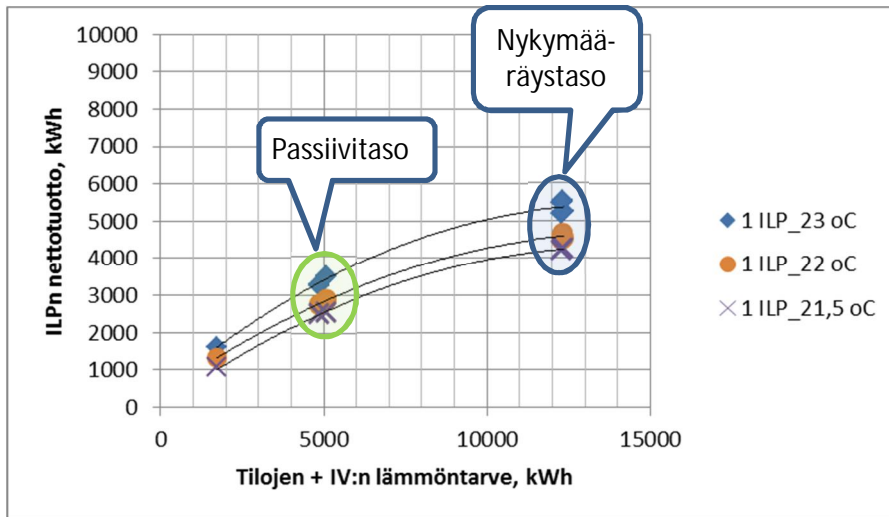
Lämmönluovutuksen hyötysuhteet on määritetty luvun 3 mukaisesti kaavoilla (7) ja (8). Kerrostuman hyötysuhteena on kaikissa tapauksissa käytetty vakioarvoa $\eta_{\text{kerrostuma}}=0,95$.

5.1 Kaksikerroksinen uusi rakennus

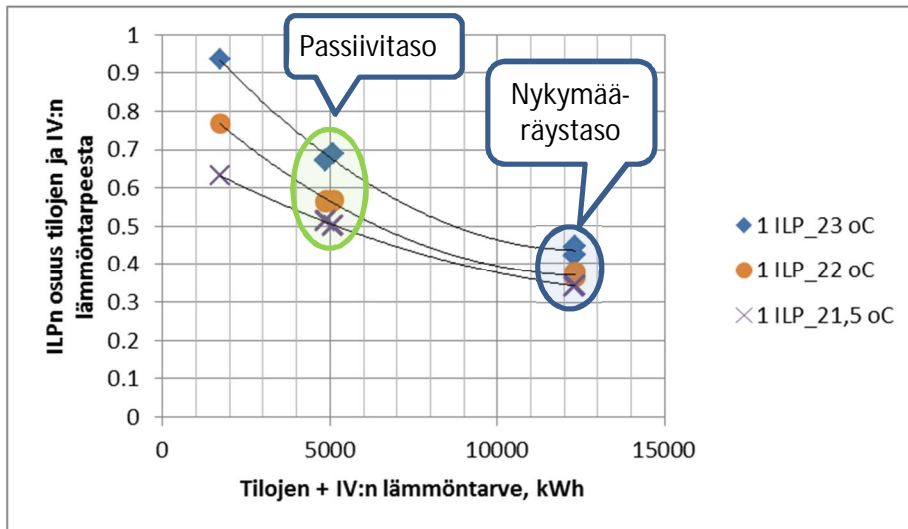
5.1.1 Ilmalämpöpumppujen nettotuotto ja osuus lämmöntuotosta

5.1.1.1 Yksi ilmalämpöpumppu alakerrassa

Ilma-ilmalämpöpumppujen nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta riippuu rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvosta, kuvat 15 ja 16. Nettotuotot on esitetty ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Tuloksista havaitaan, että mitä korkeampi asetusarvo, sitä suurempi nettotuotto. Samoin havaitaan, että mitä suurempi lämmöntarve, sitä suurempi tuotto. Toisaalta lämpöpumpun lämmönluovutusominaisuuksilla (hyvä, realistinen, vaatimaton) ei näytä olevan vaikutusta nettotuottoon.



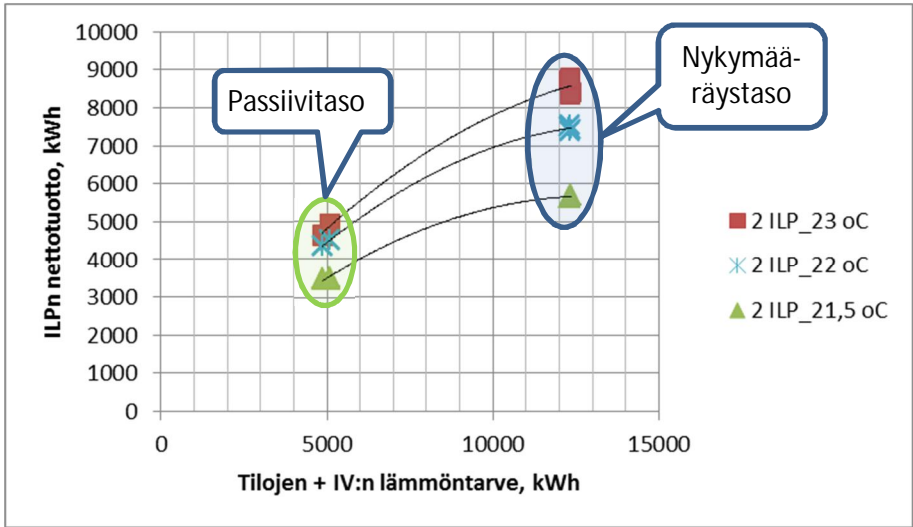
Kuva 15. Ilma-ilmalämpöpumpujen nettotuotto, kun vain alakerrassa on ilmalämpöpumppu. Nettotuotot on esitetty ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C).



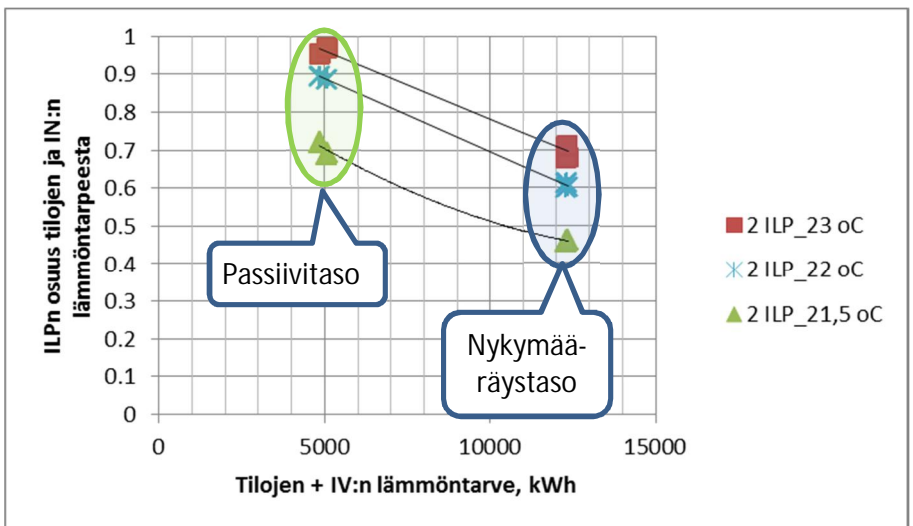
Kuva 16. Ilma-ilmalämpöpumpujen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta, kun vain alakerrassa on ilmalämpöpumppu. Osuudet on esitetty ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C).

5.1.1.2 Ilmalämpöpumppu alakerrassa ja yläkerrassa

Kun rakennukseen asennetaan kaksi ilmalämpöpumppua, toinen alakerran olohuoneeseen ja toinen yläkerran aulaan, voidaan ilmalämpöpumpuilla kattaa luonnollisesti suurempi osuus lämmöntarpeesta kuin vain yhdellä pumpulla. Nettotuotot on esitetty ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla, kuvat 17 ja 18. Tuloksista nähdään, että mitä korkeampi asetusarvo, sitä suurempi nettotuotto. Samoin havaitaan, että mitä suurempi lämmöntarve, sitä suurempi tuotto. Lämpöpumpun lämmönluovutusominaisuuksilla (hyvä, realistinen, vaatimaton) ei näytä olevan merkitystä nettotuottoon.



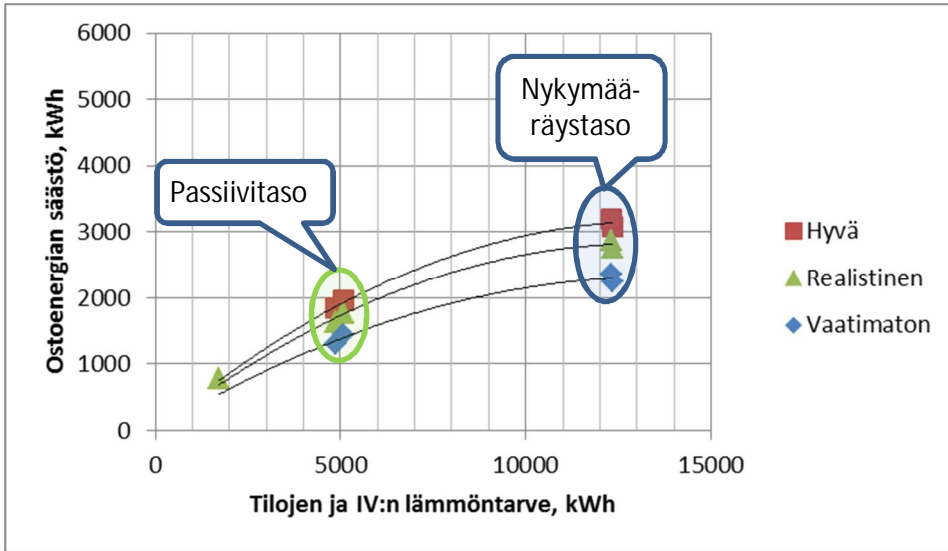
Kuva 17. Ilma-ilmalämpöpumpujen yhteenlasketut nettotuotot, kun sekä alakerrassa että yläkerrassa on ilmalämpöpumppu. Nettotuotot on esitetty ilmalämpöpumpun eri huonelämpötilan asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C).



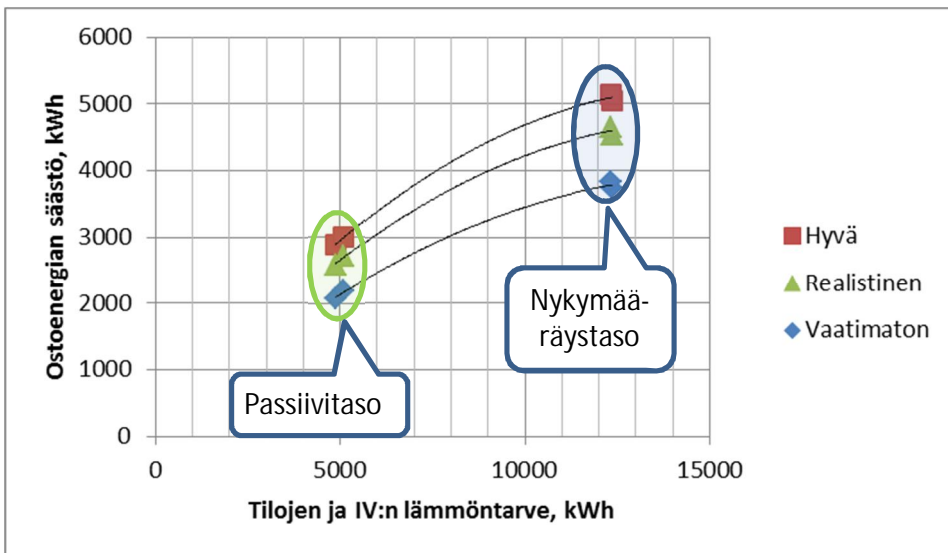
Kuva 18. Ilma-ilmalämpöpumpujen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta, kun sekä alakerrassa että yläkerrassa on ilmalämpöpumppu. Nettotuotot on esitetty ilmalämpöpumpun eri huonelämpötilan asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C).

5.1.2 Ostoenergian säästö, vuosilämpökerroin ja kokonaishyötysuhde

Kuvassa 19 on esitetty yhden lämpöpumpun (olohuoneessa) ja kuvassa 20 kahden lämpöpumpun (olohuone + yläkerran aula) simuloinneista määritetyt ostoenergian säästöt eri lämpöpumpputyypeillä. Ostoenergiaan säästöön vaikuttavat sekä ilmalämpöpumpun nettotuotto että vuosilämpökerroin.

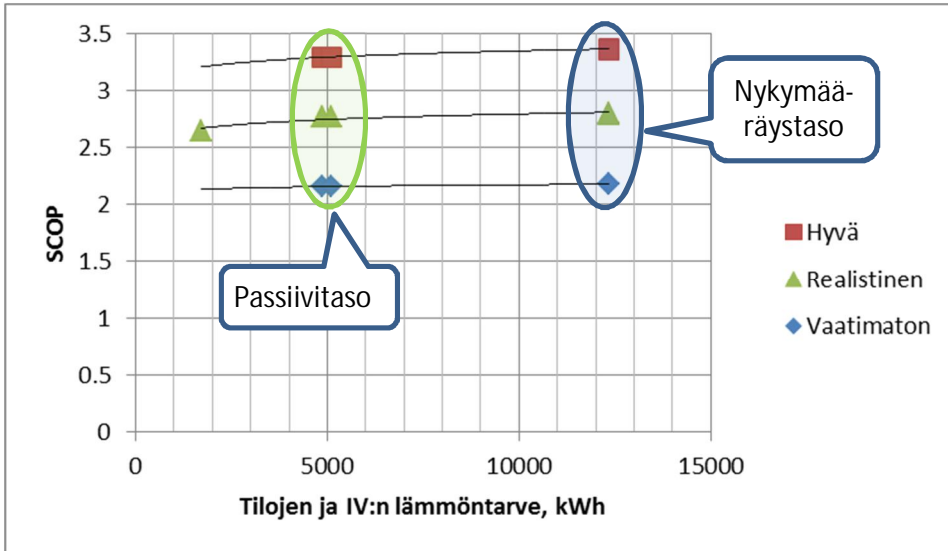


Kuva 19. Ilma-ilmalämpöpumpun ostoenergian säästö, kun vain alakerrassa on ilmalämpöpumppu. Ostoenergian säästöt on esitetty eri ilmalämpöpumpputyypeillä huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.



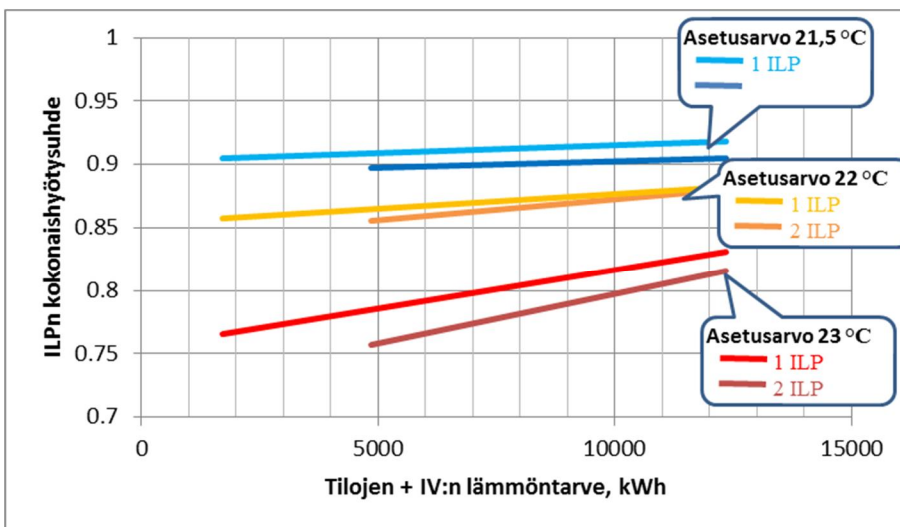
Kuva 20. Ilma-ilmalämpöpumppujen ostoenergian säästö, kun sekä alakerrassa että yläkerrassa on ilma-
lämpöpumppu. Ostoenergian säästöt on esitetty eri ilmalämpöpumpputyypeillä huonelämpötilan asetusar-
volla +22 °C.

Kuvassa 21 on esitetty vuosilämpökertoimien laskentatulokset kaikille kolmelle tarkastellulle ilmalämpö-
pumppulle huonelämpötilan asetusarvolla 22 °C.



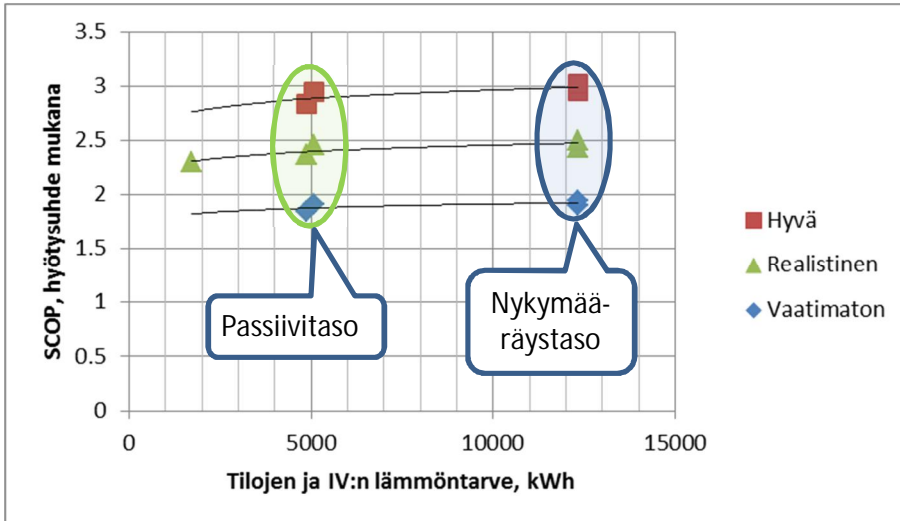
Kuva 21. Ilma-ilmalämpöpumppujen vuotuinen lämpökerroin. Lämpökertoimet on esitetty kolmelle eri lämpöpumpulle (hyvä, realistinen ja vaatimaton) huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.

Kuvassa 22 on esitetty laskennalliset ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteet, joissa on otettu huomioon sekä ilmalämpöpumppukäytön korkeampi huonelämpötila että huoneen korkeusuuntainen epäideaalinen lämpötilajakauma. Kokonaishyötysuhde huononee voimakkaasti ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvoa nostettaessa. Lisäksi rakennuksen lämmöntarpeen pienentyminen heikentää kokonaishyötysuhdetta.



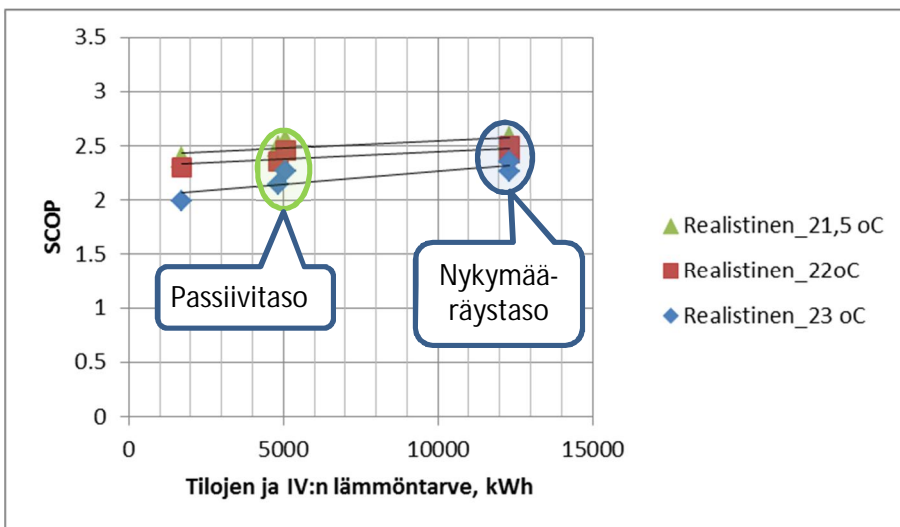
Kuva 22. Ilma-ilmalämpöpumppujen lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde. Kokonaishyötysuhteet on esitetty kolmella eri huonelämpötilan asetusarvolla ja yhden sekä kahden lämpöpumpun tapauksessa.

Kuvassa 23 esitetään vuosilämpökertoimet, joissa on otettu huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteet.



Kuva 23. Ilma-ilmalämpöpumppujen vuotuinen lämpökertoimen, jossa on otettu huomioon ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde. Lämpökertoimet on esitetty kolmelle eri lämpöpumpulle (hyvä, realistinen ja vaatimaton) huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.

Vuosilämpökertoimen riippuu jonkin verran huonelämpötilan asetusarvosta etenkin pienillä lämmöntarpeilla, kuva 24.

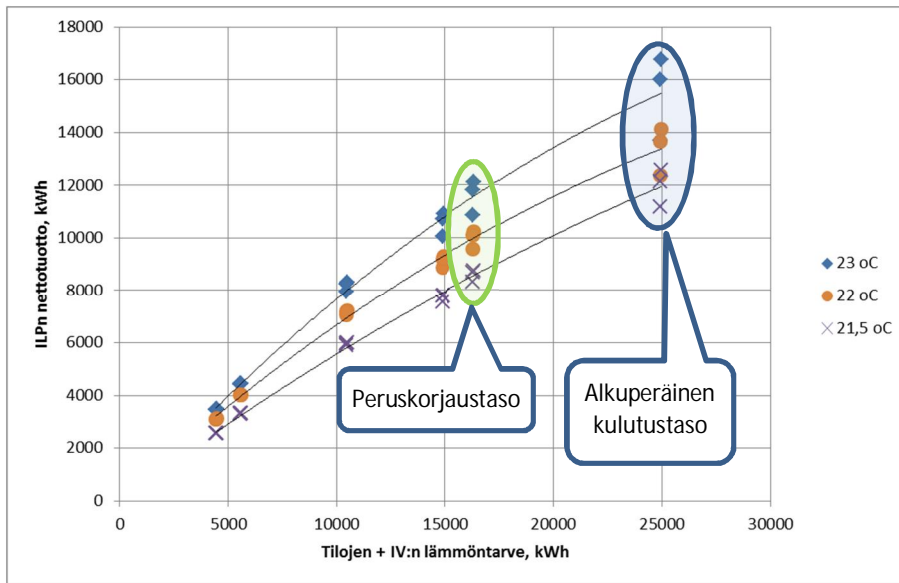


Kuva 24. Ilmalämpöpumpun vuosilämpökertoimen riippuvuus huonelämpötilan asetusarvosta.

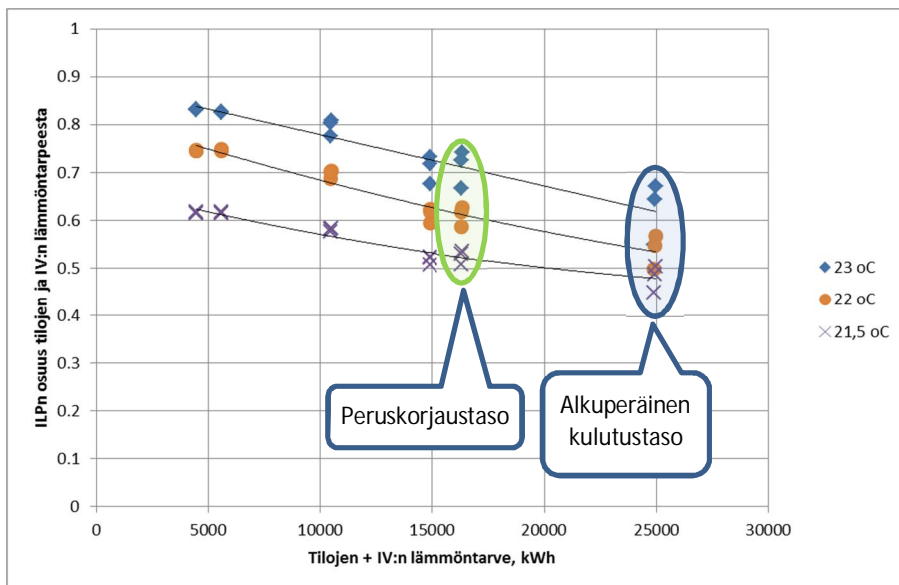
5.2 Yksikerroksinen vanha rakennus

Laskentatuloksissa esitetään yksikerroksiselle rakennukselle tuloksia myös tapauksissa, jotka kuvastavat lämmöntarpeeltaan nykymääräysten ja lähes passiivirakentamisen tasoa. Näiden tapauksien lähtötietoja ei ole esitetty rakennuksen kuvauksessa kappaleessa 4.4.2.

5.2.1 Ilmalämpöpumppujen nettotuotto ja osuus lämmöntuotosta



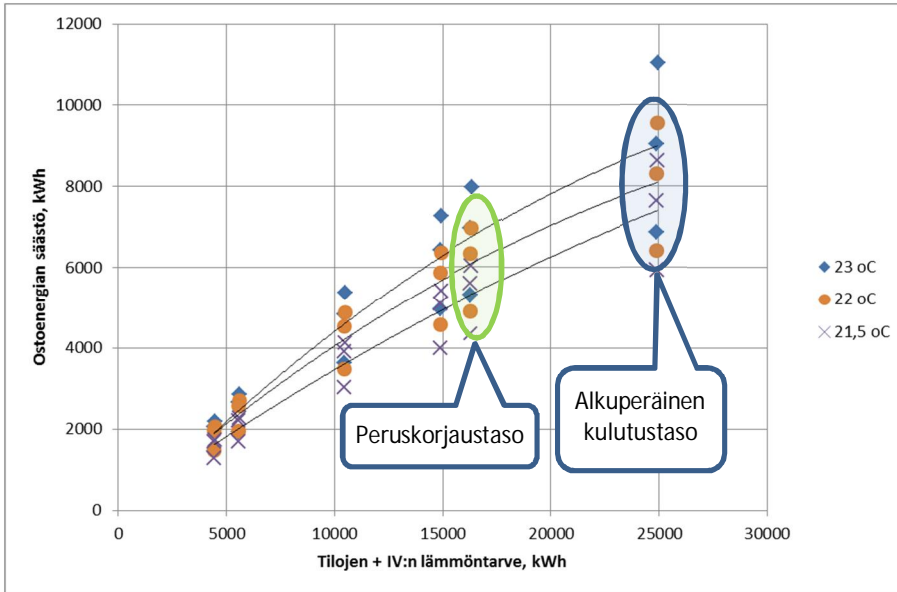
Kuva 25. Ilma-ilmalämpöpumppujen nettotuotto eri huonelämpötilan asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C). Kuvassa on esitetty kaikkien laskentatapauksien tulokset, jossa eritehoisten lämpöpumppujen (hyvä, realistinen, vaatimaton) tulosten hajonta näkyy samanväristen pisteiden eroina eri laskentatapauksissa.



Kuva 26. Ilma-ilmalämpöpumpun osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta. Osuudet on esitetty ilma-ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla (21,5 °C, 22 °C ja 23 °C).

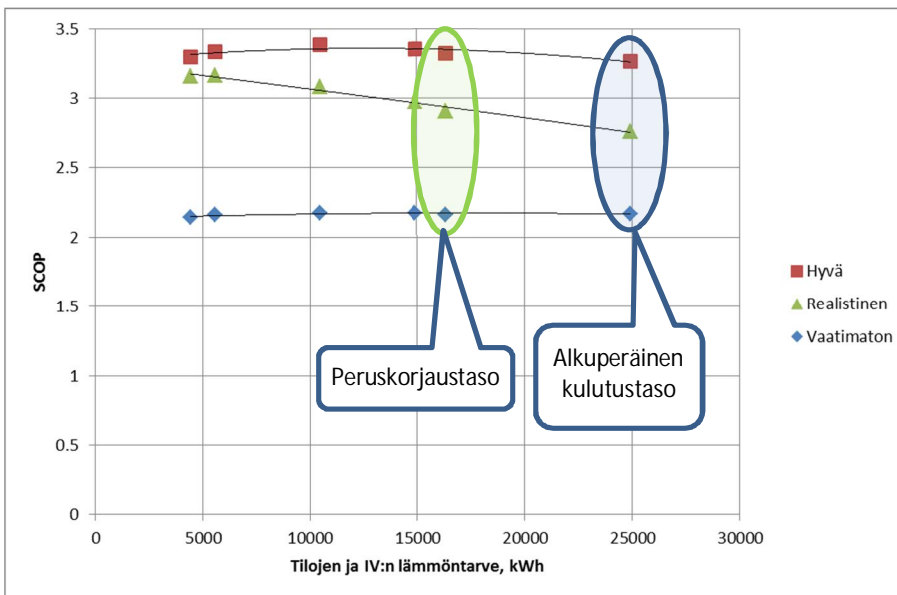
5.2.2 Ostoenergian säästö, vuosilämpökerroin ja kokonaishyötysuhde

Kuvassa 27 on esitetty simuloineista määritetyt ostoenergian säästöt eri lämpöpumpputyypeillä. Ostoenergian säästöön vaikuttavat sekä ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto että vuosilämpökerroin.



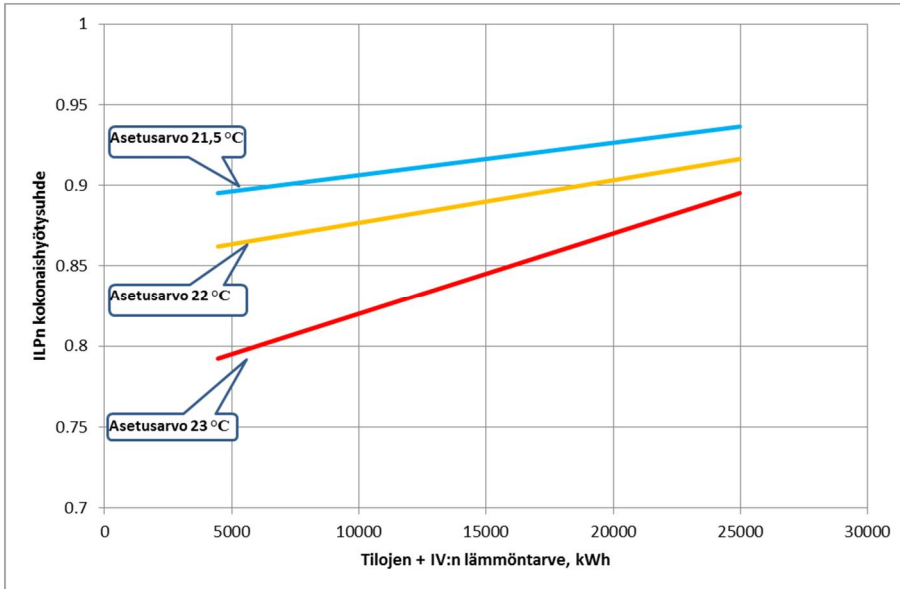
Kuva 27. Ilma-ilmalämpöpumpun ostoenergian säästö. Ostoenergian säästöt on esitetty eri ilmalämpöpumpputyypeillä huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.

Kuvassa 28 on esitetty vuosilämpökertoimien laskentatulokset kaikille kolmelle tarkastellulle ilmalämpöpumpulle huonelämpötilan asetusarvolla 22 °C.



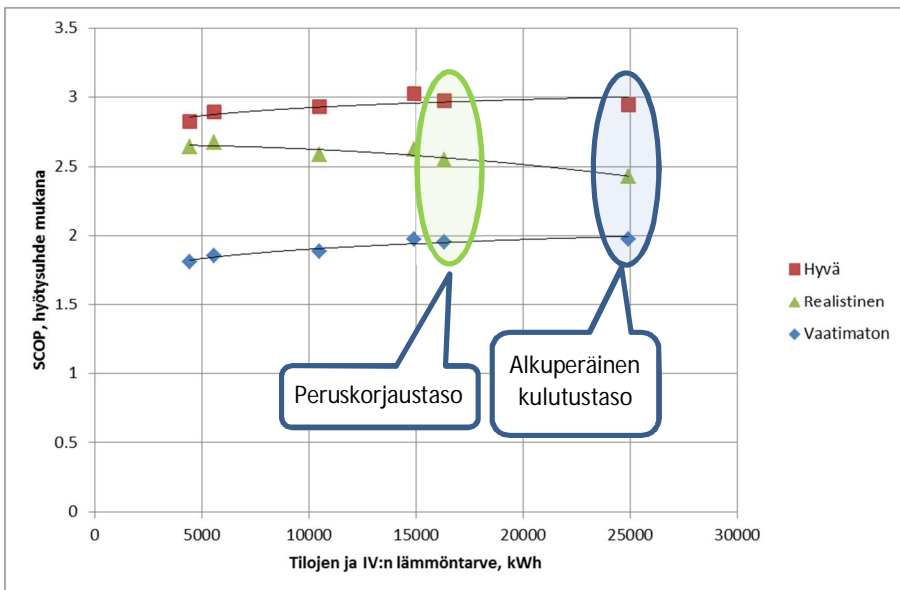
Kuva 28. Ilma-ilmalämpöpumppujen vuotuinen lämpökertoimen. Lämpökertoimet on esitetty kolmelle eri lämpöpumpulle (hyvä, realistinen ja vaatimaton) huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.

Kuvassa 29 on esitetty laskennalliset ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteet, joissa on otettu huomioon sekä ilmalämpöpumppukäytön korkeampi huonelämpötila että huoneen korkeussuuntainen epäideaalinen lämpötilajakauma. Kokonaishyötysuhde huononee voimakkaasti ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvoa nostettaessa. Lisäksi rakennuksen lämmöntarpeen pienentyminen heikentää kokonaishyötysuhdetta.



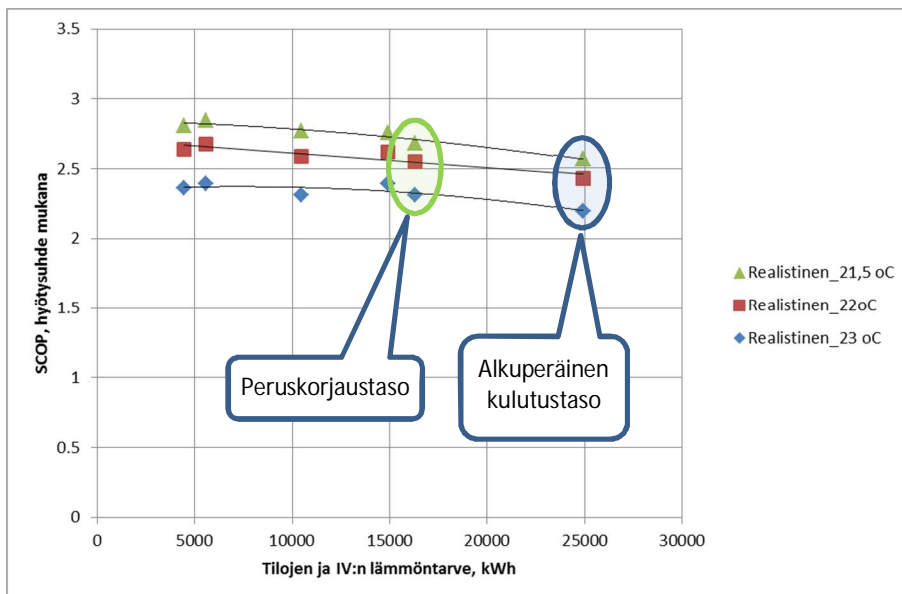
Kuva 29. Ilma-ilmalämpöpumpujen lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde. Kokonaishyötysuhteet on esitetty kolmella eri huonelämpötilan asetusravolla.

Kuvassa 30 esitetään vuosilämpökertoimet, joissa on otettu huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteet.



Kuva 30. Ilma-ilmalämpöpumpujen vuotuinen lämpökertoimen, jossa on otettu huomioon ilmalämpöpumpun lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde. Lämpökertoimet on esitetty kolmelle eri lämpöpumpulle (hyvä, realistinen ja vaatimaton) huonelämpötilan asetusravolla +22 °C.

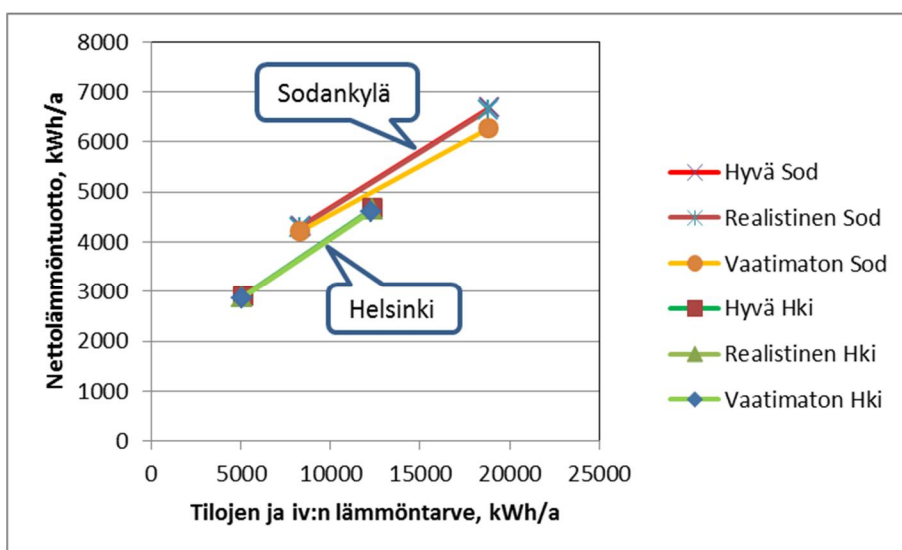
Vuosilämpökertoimen riippuu jonkin verran huonelämpötilan asetusravosta etenkin pienillä lämmöntarpeilla, kuva 31.



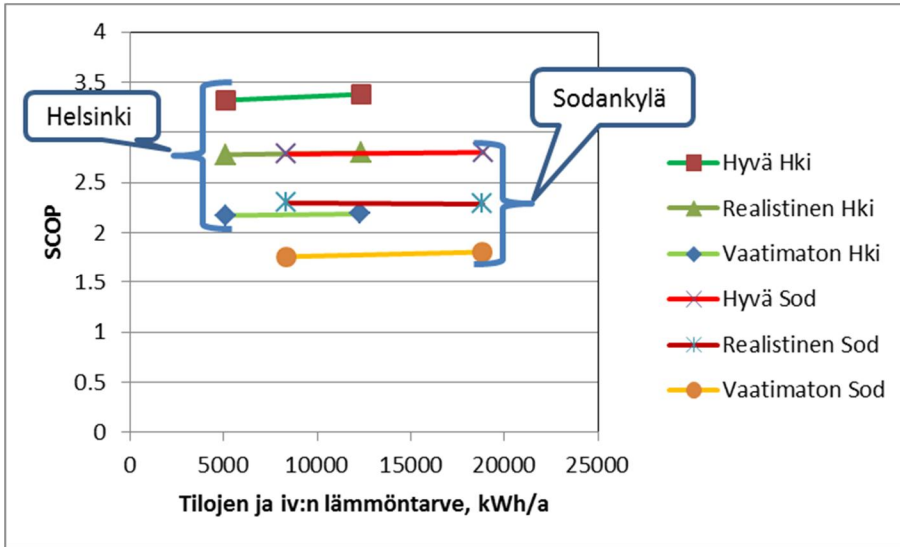
Kuva 31. Ilmalämpöpumpun vuosilämpökertoimen riippuvuus huonelämpötilan asetusravosta.

5.3 Ilmaston vaikutus ilma-ilmalämpöpumpun tuottoarvoihin

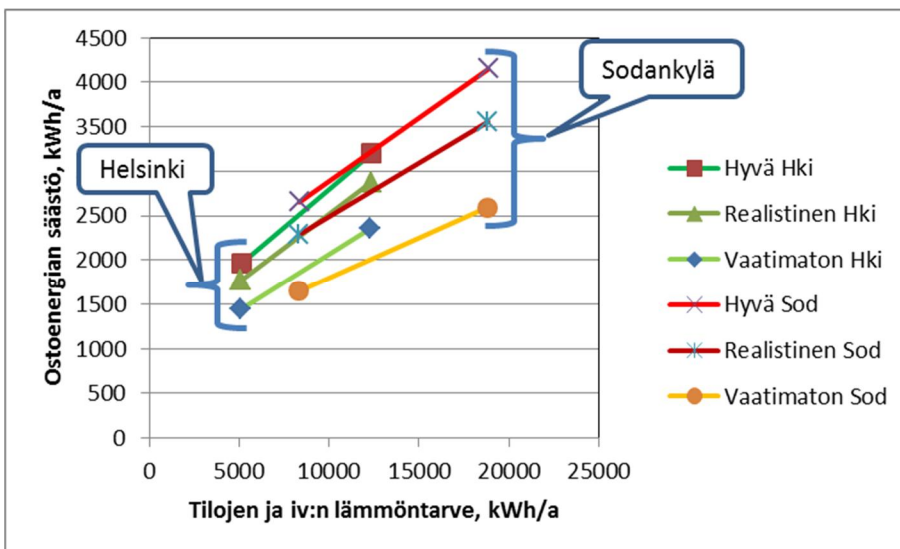
Seuraavassa on esitetty (kuvat 32–34) sääolosuhteiden vaikutukset ilma-ilmalämpöpumppujen nettotuottoon, SCOP-arvoon sekä ostoenergian nettosäästöön. Tarkastelu on tehty uutta rakennuskantaa edustavalla kaksikerroksisella pientalolla nykymääräysten mukaisilla ja passiivitason mukaisilla ratkaisuilla. Ilma-ilmalämpöpumpuista tarkasteltiin kaikkia kolmea aiemminkin käytettyä lämpöpumpputyyppeä (hyvä, realistinen ja vaatimaton). Ilmalämpöpumppujen asetusarvo on kaikissa tarkasteluissa +22 °C.



Kuva 32. Ilmalämpöpumpun nettotuotto Helsingissä ja Sodankylässä. Tarkastelu on tehty samalla rakennuksella nykymääräystenmukaisilla rakenteilla ja ilmanvaihdolla sekä passiivitason rakenteilla ja ilmanvaihdolla.



Kuva 33. Ilmalämpöpumpun SCOP Helsingissä ja Sodankylässä. SCOP ei sisällä hyötysuhdetta. Tarkastelu on tehty samalla rakennuksella nykymääräystenmukaisilla rakenteilla ja ilmanvaihdolla sekä passiivitaso rakenteilla ja ilmanvaihdolla.



Kuva 34. Ilmalämpöpumpun nettosäästö Helsingissä ja Sodankylässä. Tarkastelu on tehty samalla rakennuksella nykymääräystenmukaisilla rakenteilla ja ilmanvaihdolla sekä passiivitaso rakenteilla ja ilmanvaihdolla.

Ilma-ilmalämpöpumpujen nettotuotto (kuva 32) on Sodankylässä jonkin verran suurempi kuin Helsingissä. Toisaalta lämpökertoimet (kuva 33) ovat Helsingin olosuhteissa paremmat kuin Sodankylässä. Sodankylän suurempi nettotuotto kompensoi pienempää lämpökerrointa, jolloin ostoennergian nettosäästö (kuva 34) on samalla lämmöntarpeella melko lailla samansuuruinen kuin Helsingin olosuhteissa. Ostoennergian nettosäästö kuvaa ulkoilmasta hyödynnettävää lämpöenergiaa.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä raportissa on esitetty kolme erilaista menetelmää, joilla ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto, vuosilämpökerroin ja sähkönkulutus voidaan määrittää:

1. Yksinkertainen energiamerkintään tukeutuva menetelmä, jossa ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto määritellään kiinteänä prosenttiosuutena asunnon tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergiatarpeesta. Ehdotettu prosenttiosuus on 40 %.
2. Yksinkertainen laskennallinen menetelmä, jossa nettotuotto määritellään tapauskohtaisesti ilmalämpöpumpun vaikutuspiirin pinta-alan suhteena huoneistopinta-alaan.
3. Yksityiskohtainen simulointiin perustuva menetelmä.

Raportissa on esitetty yksityiskohtaisiin simulointeihin perustuvia tuloksia ominaisuuksiltaan erityyppisille ilma-ilmalämpöpumpuille erilaisen lämmöntarpeen omaaviin pientaloihin. Tarkasteltavina pientaloina olivat Cost optimal -hankkeessa esitellyt nykyistä rakentamistapaa edustava kaksikerroksinen pientalo ja vanhaa rakennuskantaa edustava yksikerroksinen pientalo. Kummallakin rakennustyypillä tarkasteltiin kahta eri energiantarvetasoa: uudisrakennuksella nykymääräysten mukaista tasoa ja passiivitasoa sekä vanhalla rakennuksella peruskorjaamatonta ja peruskorjattua tasoa. Seuraavassa on esitetty yhteenveto näistä simulointituloksista pelkästään ilma-ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvolle +22 °C sekä alkupe räisen suunnitelman mukaisille rakennustyypeille. Raportissa on esitetty huomattavasti kattavammat tulokset niin huonelämpötilan asetusarvon kuin rakennuksen lämmöntarpeenkin suhteen. Huonelämpötilan asetusarvo +22 °C valittiin sillä perusteella, että se ei ylitä asumisterveysasetuksen asuinhuoneille lämmityskaudella esitettyä maksimilämpötilatasoa (+23 °C).

6.1 Kaksikerroksinen uusi rakennus

IDA-ICE-simulointiohjelmistolla laskettujen tulosten yhteenveto on esitetty taulukoissa 11–13 ominaisuuksiltaan erilaisille lämpöpumpuille (hyvä, realistinen, vaatimaton) tapauksessa, jossa on käytetty vain yhtä ilma-ilmalämpöpumpua alakertaan asennettuna. Taulukoissa 14–16 on esitetty vastaavat tulokset tapaukselle, jossa sekä alakerrassa että yläkerrassa on ilma-ilmalämpöpumppu.

Taulukko 11. Hyvällä ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	4550	53	3080	3,38	0,91	2,95
Passiivitaso	4900	2770	61	1840	3,32	0,89	2,83

Taulukko 12. Realistisella ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	4530	53	2760	2,80	0,87	2,44
Passiivitaso	4900	2760	61	1640	2,78	0,85	2,36

Taulukko 13. Vaatimattomalla ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	4500	52	2240	2,19	0,87	1,90
Passiivitaso	4900	2740	60	1320	2,17	0,85	1,84

Taulukko 14. Hyvällä ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde ja vuosilämpökerroin,

jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	7420	86	5040	3,38	0,88	2,96
Passiivitaso	4900	4360	96	2870	3,31	0,85	2,88

Taulukko 15. Realistisella ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	7400	86	4540	2,80	0,88	2,45
Passiivitaso	4900	4350	96	2580	2,77	0,85	2,35

Taulukko 16. Vaatimattomalla ilma-ilmalämpöpumpulla kaksikerroksiselle uutta rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Nykymääräysten mukainen	12300	7360	86	3730	2,19	0,86	1,91
Passiivitaso	4900	4330	96	2080	2,17	0,85	1,84

Yksi alakertaan asennettu ilma-ilmalämpöpumppu pystyy simulointien perusteella kattamaan nykymääräysten mukaisessa rakennuksessa runsaat 50 % ja passiivitason rakennuksessa runsaat 60 % tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeesta. Vastaavasti kaksi lämpöpumppua asennettuna eri kerroksiin pystyvät kattamaan nykymääräysten mukaisessa rakennuksessa noin 85 % ja passiivitason rakennuksessa noin 95 % tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta.

Simulointien perusteella nettotuottoon eivät merkittävästi vaikuta tutkittujen lämpöpumppujen lämmön- tuotto-ominaisuudet tutkitulla rakennuksen lämmöntarvealueella ja tutkituilla huoneratkaisuilla. Nettotuoton osuus lämmöntarpeesta on noin 10 % suurempi passiivitasolla kuin nykymääräystasolla. Tämä selittyy sillä, että huonelämpötilatasot ovat kummassakin tapauksessa likipitään samat, jolloin myös ilmavirtausten mukana huoneisiin siirtyvät lämmitystehot ovat samoja. Tällöin sama ilmavirtausten mukana siirtyvä lämmitysteho passiivitasolla pystyy kattamaan suuremman osuuden niiden huoneiden lämmöntarpeesta, joissa ei ole lämpöpumppua.

Ilma-ilmalämpöpumppujen simuloitua vuosilämpökertoimet (SCOP) vaihtelivat likimain välillä 3,4–2,2. Vuosilämpökertoimeen ei niinkään vaikuttanut rakennuksen lämmöntarve vaan simuloinnissa käytetyn ilma-ilmalämpöpumpun ominaisuudet. Saatuihin tuloksiin on syytä suhtautua varauksella, koska lämpöpumpun mallinnuksessa ei onnistuttu täysin jäljittelemään valmistajan ilmoittamia ominaisuuksia (ks. liite H). Arvion mukaan hyvällä lämpöpumpulla saadut tulokset ovat lähimpänä todellisuutta.

Lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteet vaihtelivat simuloituissa tapauksissa välillä 0,91–0,85. Kokonaishyötysuhde sisältää ilma-ilmalämpöpumpun käytöstä aiheutuvat rakennuksen lisälämpöhäviöt sekä huonelämpötilan pystysuuntaisesta epäideaalisesta lämpötilajakaumasta johtuvat lisälämpöhäviöt. Pystysuuntaista lämpötilajakaumaa ja sen aiheuttamaa lisälämpöhäviötä ei tutkittu tässä hankkeessa, joten tämä ilmiö otettiin huomioon vakiohyötysuhteella 0,95. Kokonaishyötysuhteen huomioon ottavat lämpöker- toimet vaihtelivat välillä 3,0–1,8.

Ostoenergian säästö on yhtä suuri kuin ilma-ilmalämpöpumpun uusiutuvan energian käyttö. Jäljelle jäävä energiankulutus muodostuu varsinaisen lämmitysjärjestelmän energiankulutuksesta ja lämpöpumpun sähkönkulutuksesta. Energiansäästö riippuu rakennuksen lämmöntarpeesta ja lämpöpumpun ominaisuuksista.

Kaksikerroksisella rakennuksella tarkasteltiin myös sääolosuhteiden vaikutusta ilma-ilmalämpöpumppujen toimintaan. Tarkastelut tehtiin vertailemalla samoilla pientalon rakenne- ja ilmanvaihtoratkaisuilla lämpöpumppujen tuottoa, lämpökerrointa ja uusiutuvan energian käyttöä Helsingissä ja Sodankylässä. Tulosten perusteella ilma-ilmalämpöpumppujen vuotuinen nettotuotto on suurempi Sodankylässä kuin Helsingissä. Helsingissä lämpökerroin on selvästi suurempi kuin Sodankylässä, ja uusiutuvan energian käyttö on samaa suuruusluokkaa samalla lämmöntarpeella kummassakin sääolosuhteessa.

6.2 Yksikerroksinen vanha rakennus

IDA-ICE-simulointiohjelmistolla laskettujen tulosten yhteenveto on esitetty taulukoissa 17–19 ominaisuuksiltaan erilaisille lämpöpumpuille (hyvä, realistinen, vaatimaton) tapauksessa, jossa on käytetty vain yhtä ilma-ilmalämpöpumppua.

Taulukko 17. Hyvällä ilma-ilmalämpöpumpulla yksikerroksiselle vanhaa rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Vanha	24900	14130	57	9560	3,26	0,90	2,94
Peruskorjattu	14900	9290	62	6370	3,34	0,91	3,03

Taulukko 18. Realistisella ilma-ilmalämpöpumpulla yksikerroksiselle vanhaa rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Vanha	24900	13660	55	8300	2,68	0,90	2,43
Peruskorjattu	14900	9220	62	5870	2,89	0,91	2,62

Taulukko 19. Vaatimattomalla ilma-ilmalämpöpumpulla yksikerroksiselle vanhaa rakennuskantaa edustavalle rakennukselle simulointien perusteella saadut nettotuotto ja sen osuus lämmöntarpeesta, uusiutuvan energian käyttö, vuosilämpökerroin (SCOP), lämmönluovutuksen hyötysuhde ja vuosilämpökerroin, jossa on otettu huomioon lämmönjaon hyötysuhde (SKER). Lämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvo on +22 °C.

Rakennus	Tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarve kWh	Nettotuotto kWh	Osuus lämmöntarpeesta %	Ostoenergian säästö = uusiutuva energia kWh	SCOP	Hyötysuhde	SKER
Vanha	24900	12380	50	6420	2,17	0,91	1,98
Peruskorjattu	14900	8860	59	4590	2,17	0,91	1,97

Projektin aikana havaittiin, että työssä käytettyä ilma-ilmalämpöpumpun simulointimallia oli haastavaa saada viritettyä vastaamaan todellista lämpöpumpun käyttäytymistä etenkin lämpöpumpun osakuormitusti-

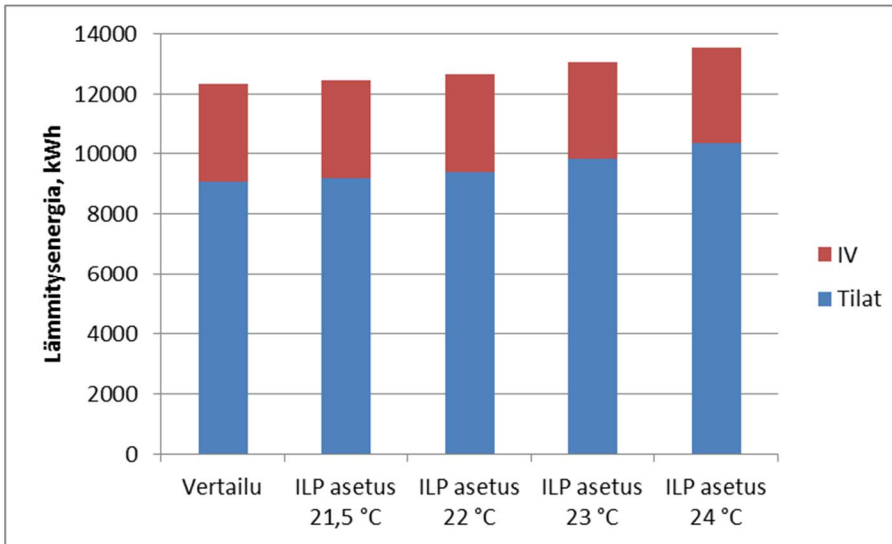
lanteissa. Tästä syystä simulointituloksiin on syytä suhtautua varauksella ennen kaikkea laskettujen vuosilämpökerrointen (SCOP) osalta. Tuloksia tulee tältä osin tulkita suuntaa antaviksi.

Lähteet

- Commission delegated regulation (EU) No 626/2011 of 4 May 2011. Supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to energy labelling of air conditioners.
- Laitinen, A., Tuominen, P., Holopainen, R., Tuomaala, P., Jokisalo, J., Eskola, L. & Sirén, K. 2014. Renewable energy production of Finnish heat pumps. VTT Technology 164. Espoo: VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2014/T164.pdf>
- Lämmitysjärjestelmät ja lämmin käyttövesi – laskentaopas. 2011. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- Lämpöpumppujen energialaskentaopas 3.10.2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- SFS-EN 14511:2011. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling. Parts 1–4.
- SFS-EN 14825:2012. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling – Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance.
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C1. 1998. Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksissa, määräykset ja ohjeet 1998. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto. Helsingissä 4 päivänä kesäkuuta 1998.
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. 2012. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta 2/11. Rakennuksen energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Helsingissä 30 päivänä maaliskuuta 2011.
- Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. 2012. Ympäristöministeriön ohjeet rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta 6/3. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Helsingissä 17 päivänä toukokuuta 2013.
- Suomen lämpöpumppuyhdistys ry. Lämpöpumpputilasto.
<http://www.sulpu.fi/documents/184029/209175/Lampopumpputilastoja-SULPU.pdf>

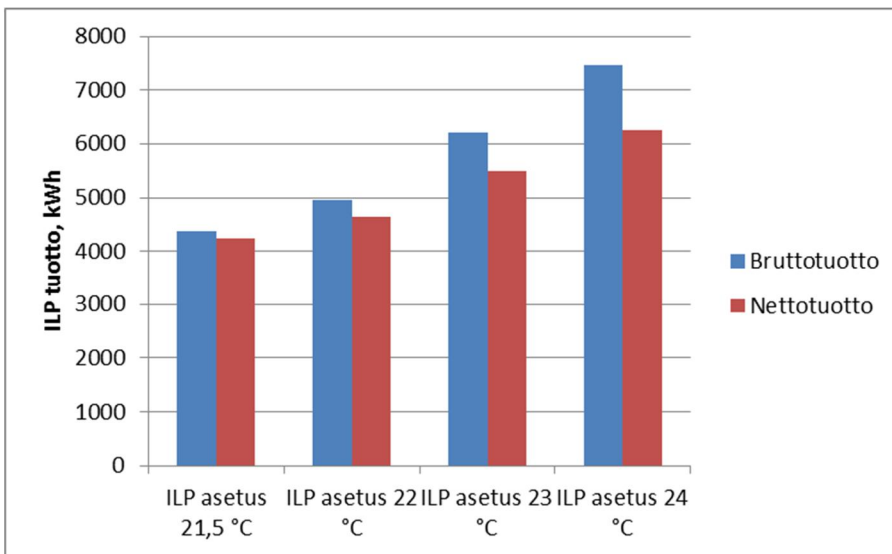
Liite A: Tulokset nykyisten määräysten mukaisella kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella, vain alakertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva A1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumppua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Laskennassa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



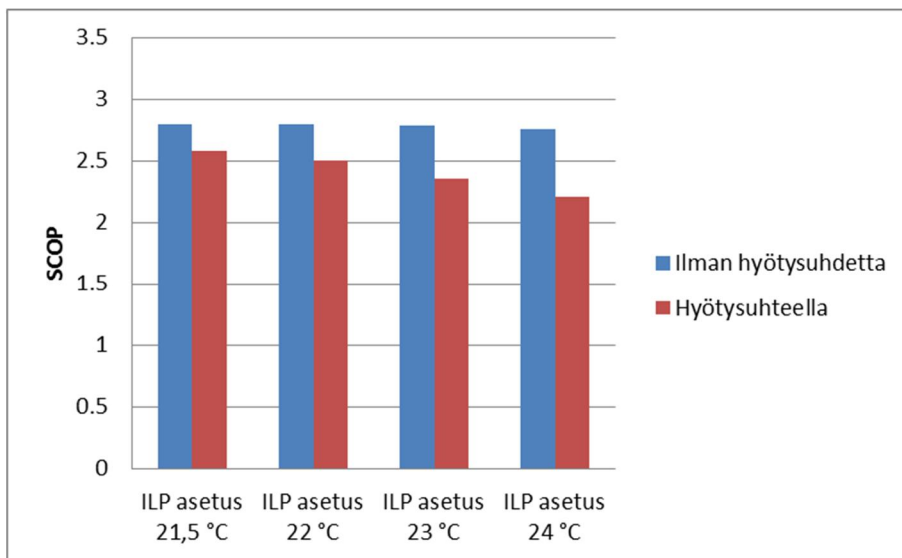
Kuva A1. Nykyisten määräysten mukaisen rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realistisen ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpulla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä. Kuvassa A2 on esitetty sekä ilmalämpöpumpun bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetyin lisälämpöhäviön verran pienempi nettotuotto.



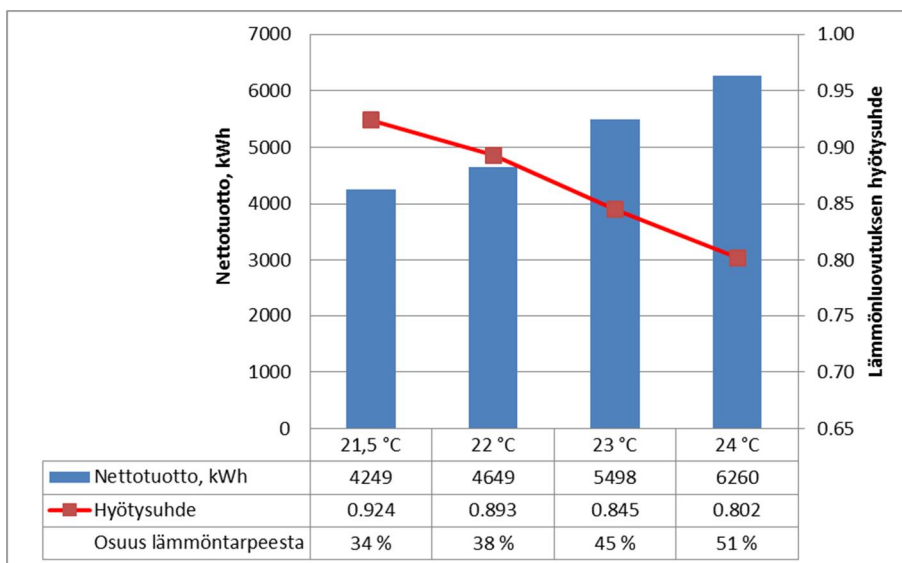
Kuva A2. Realistisen ilmalämpöpumpun vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumpun käyttö tässä tarkastelussa lisää lämpöhäviöitä, on määräyksiä ajatellen määritetty myös vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva A3.



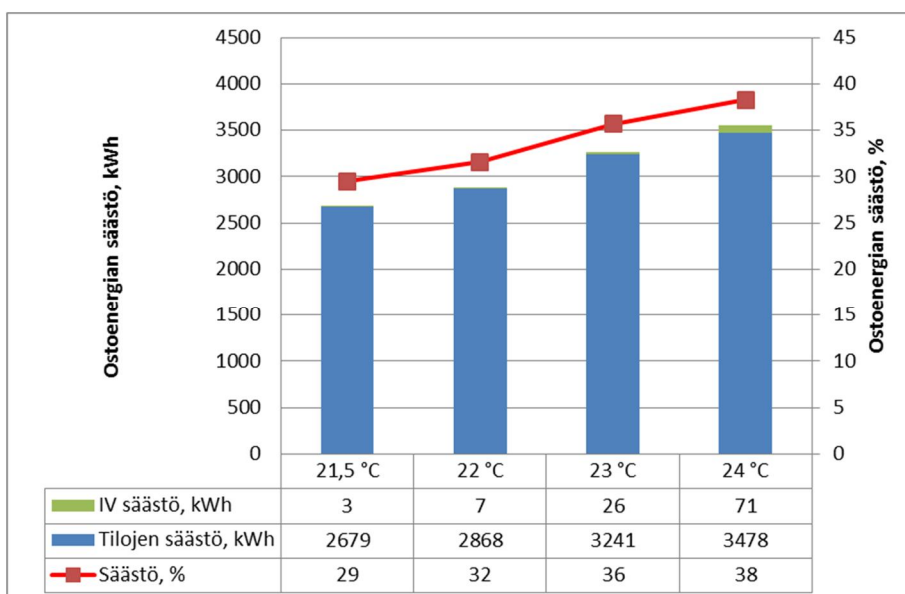
Kuva A3. Realistisen ilmalämpöpumpun vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Seuraavassa (kuva A4) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva A2) ilmalämpöpumpun nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



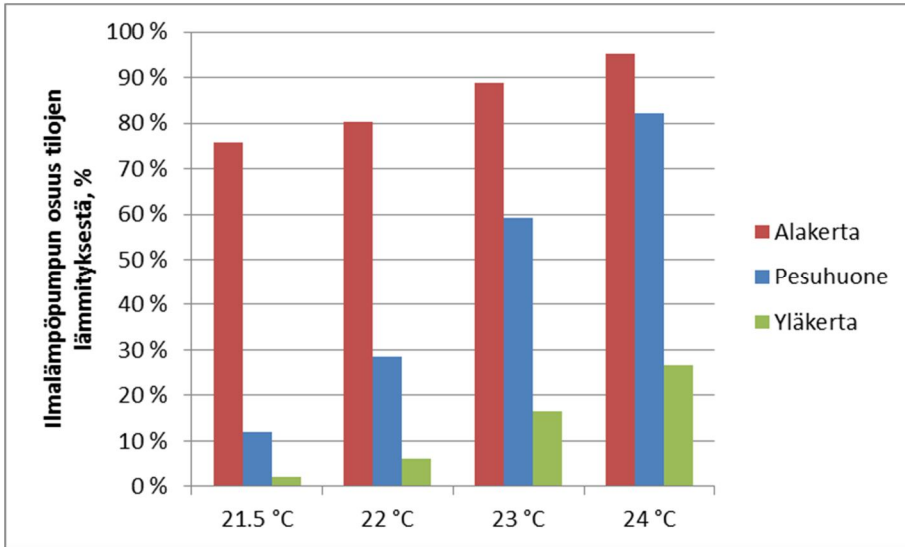
Kuva A4. Realistisen ilmalämpöpumpun nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa A5 on esitetty ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumpua laskettuun vertailukulutukseen.



Kuva A5. Realistisen ilmalämpöpumpun ostoenergiesäästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergiesäästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

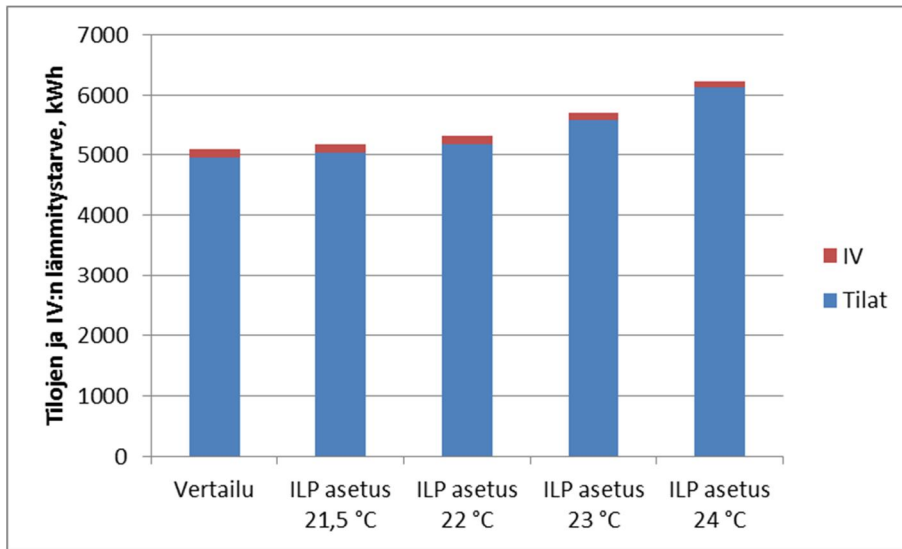
Kuvassa A6 on havainnollistettu lämmön kulkeutumista eri kerroksiin ja tiloihin. Kuvasta nähdään, että alakertaan sijoitetun ilmalämpöpumpun lämpö ei kovin tehokkaasti siirry yläkerran tiloihin, vaikka kaikkien muiden tilojen, paitsi pesuhuoneen, ovet ovat täysin auki.



Kuva A6. Realistisen ilmalämpöpumpun osuus tilojen lämmityksestä alakerrassa, erikseen alakerran pesuhuoneessa ja yläkerrassa nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

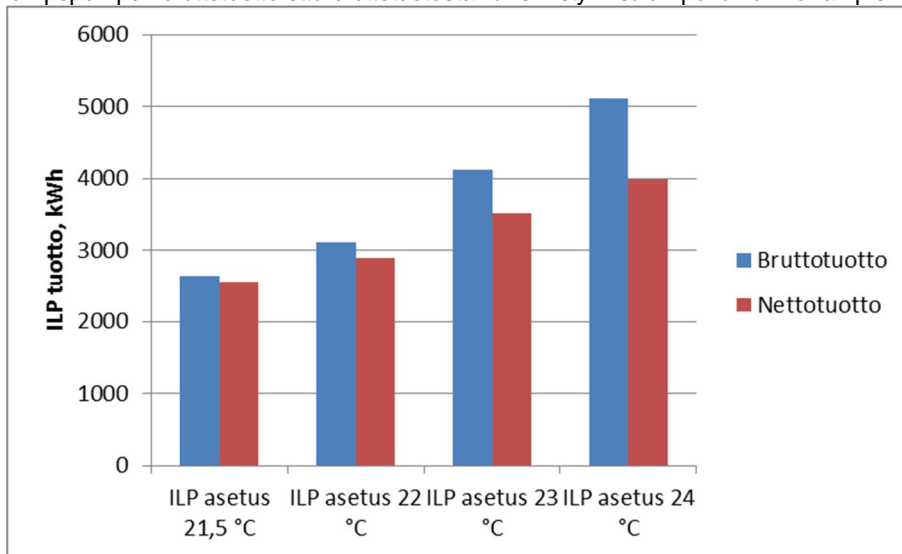
Liite B: Tulokset passiivitason (lähes nollaenergia) kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella, vain alakertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva B1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumppua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Laskennassa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



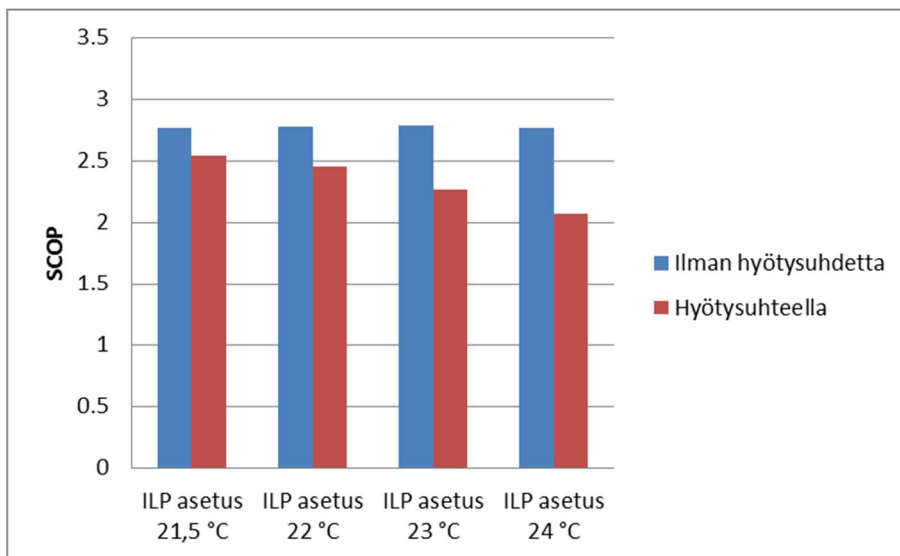
Kuva B1. Nykyisten määräysten mukaisen rakennuksen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realistisen ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpulla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä. Kuvassa B2 on esitetty sekä ilmalämpöpumpun bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetyin lisälämpöhäviön verran pienempi nettotuotto.



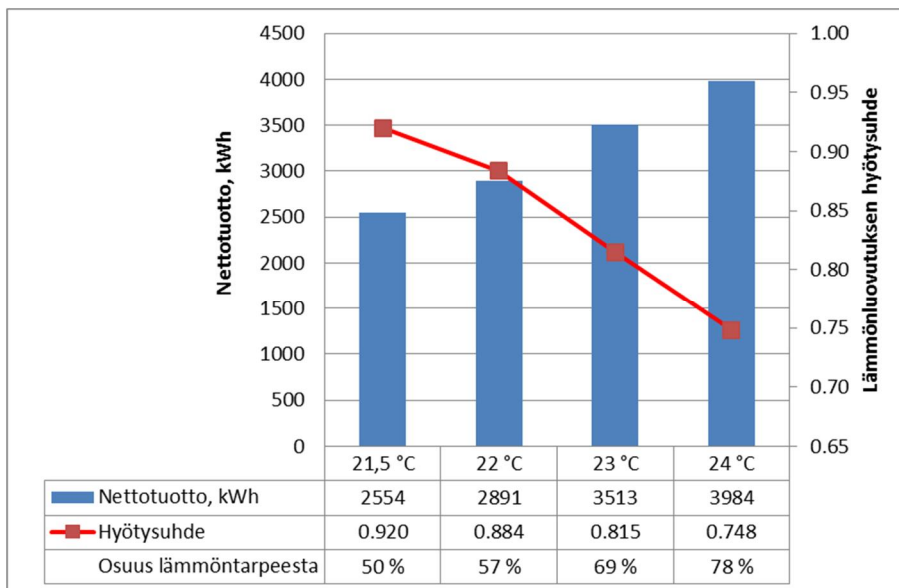
Kuva B2. Realistisen ilmalämpöpumpun vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumpun käyttö tässä tarkastelussa lisää lämpöhäviöitä, on määräyksiä ajatellen määritetty myös vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva B3.



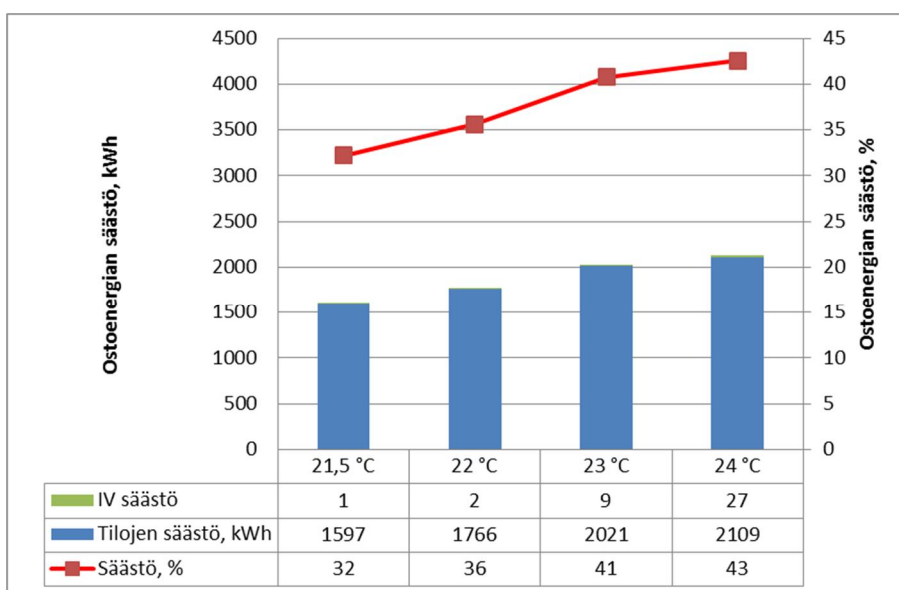
Kuva B3. Realistisen ilmalämpöpumpun vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Seuraavassa (kuva B4) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva B2) ilmalämpöpumpun nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



Kuva B4. Realistisen ilmalämpöpumpun nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

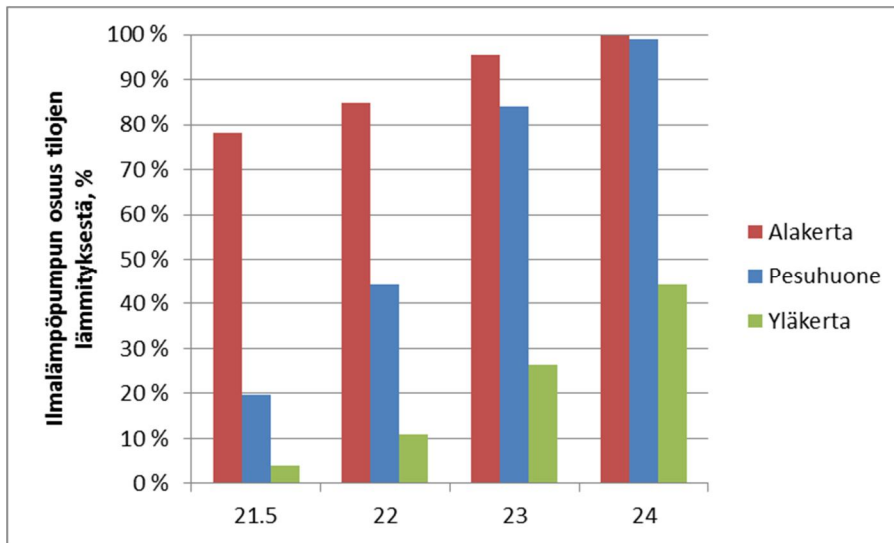
Kuvassa B5 on esitetty ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumpua laskettuun vertailukulutukseen.



Kuva B5. Realistisen ilmalämpöpumpun ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa B6 on havainnollistettu lämmön kulkeutumista eri kerroksiin ja tiloihin. Kuvasta nähdään, että ilmalämpöpumpun lämpö ei kovin tehokkaasti siirry yläkerran tiloihin, vaikka kaikkien muiden tilojen, paitsi pesuhuoneen, ovet ovat täysin auki. Tosin prosentuaalisesti ilmalämpöpumppu pystyy kattamaan suuremman osan yläkerran lämmityksestä kuin nyky määräysten mukaisessa talossa (liite A). Tämä johtuu

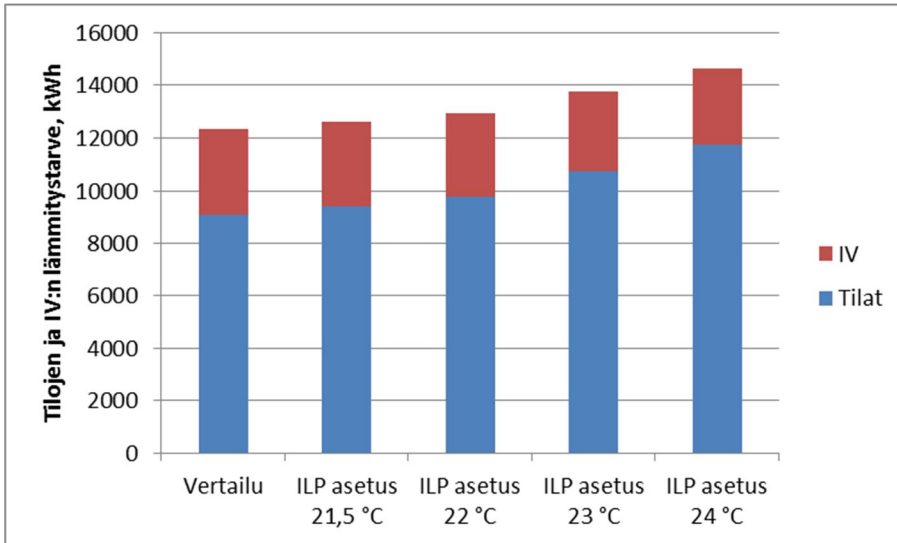
lähinnä siitä, että vaikka lämmönsiirtyminen on kummassakin tapauksessa lähes yhtä suuri, niin tämä riittää passiivitalossa kattamaan suuremman osan tarpeesta.



Kuva B6. Realistisen ilmalämpöpumpun osuus tilojen lämmityksestä alakerrassa, erikseen alakerran pesuhuoneessa ja yläkerrassa nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetuservoilla.

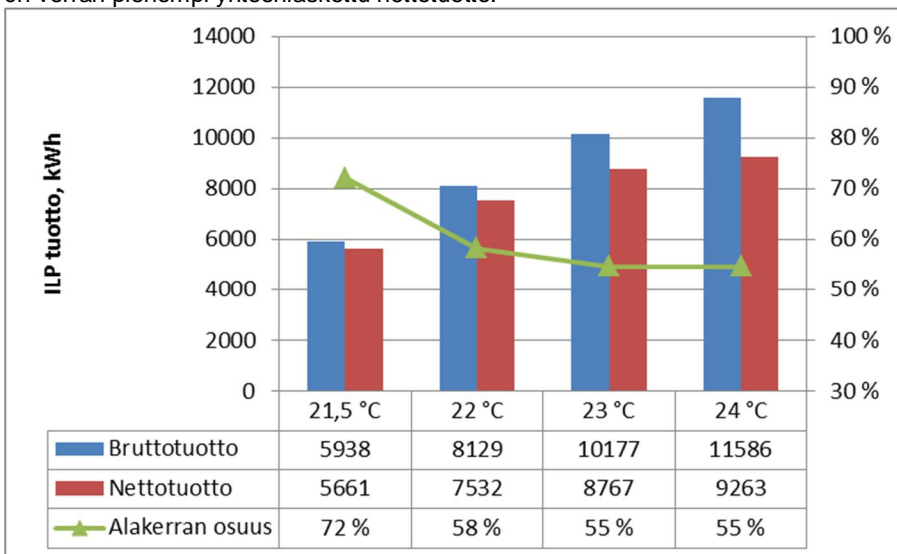
Liite C: Tulokset nykyisten määräysten mukaisella kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella sekä ala- että yläkertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva C1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumpua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Laskennassa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



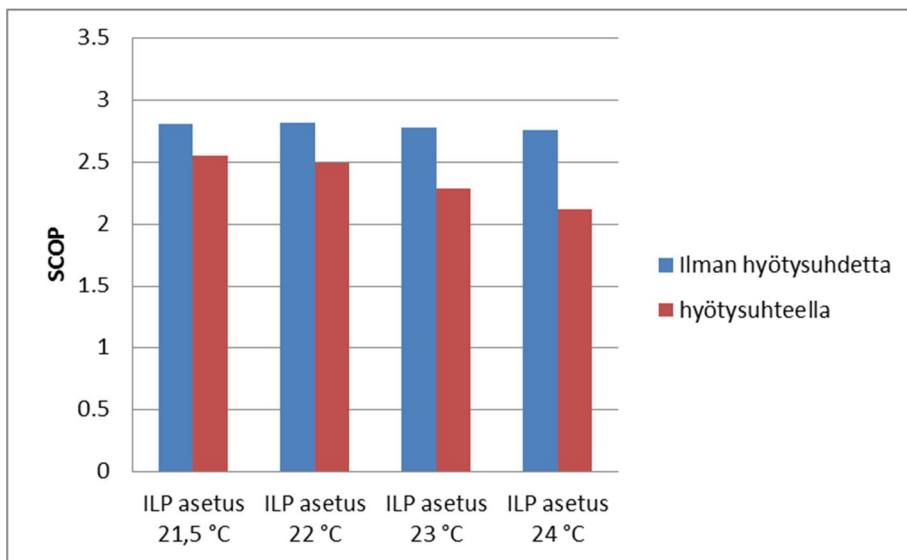
Kuva C1. Nykyisten määräysten mukaisen rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realististen ilmalämpöpumpujen huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpuilla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä johtuen. Kuvassa C2 on esitetty sekä ilmalämpöpumpujen yhteenlaskettu bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetty lisälämpöhäviön verran pienempi yhteenlaskettu nettotuotto.

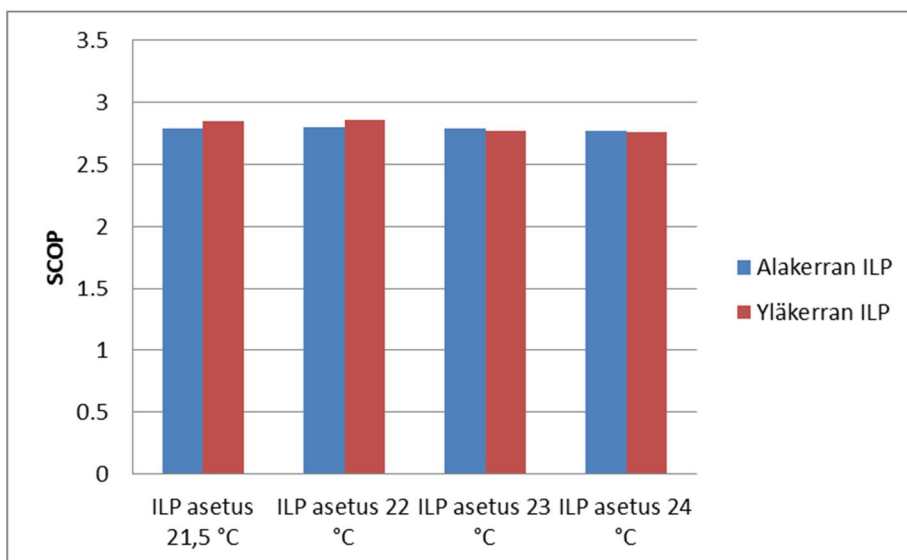


Kuva C2. Realististen ilmalämpöpumppujen yhteenlaskettu vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumpun käyttö tässä tarkastelussa lisää lämpöhäviöitä, on määräksiä ajatellen määritetty myös lämpöpumppujen keskimääräinen vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva C3 ja kuva C4.

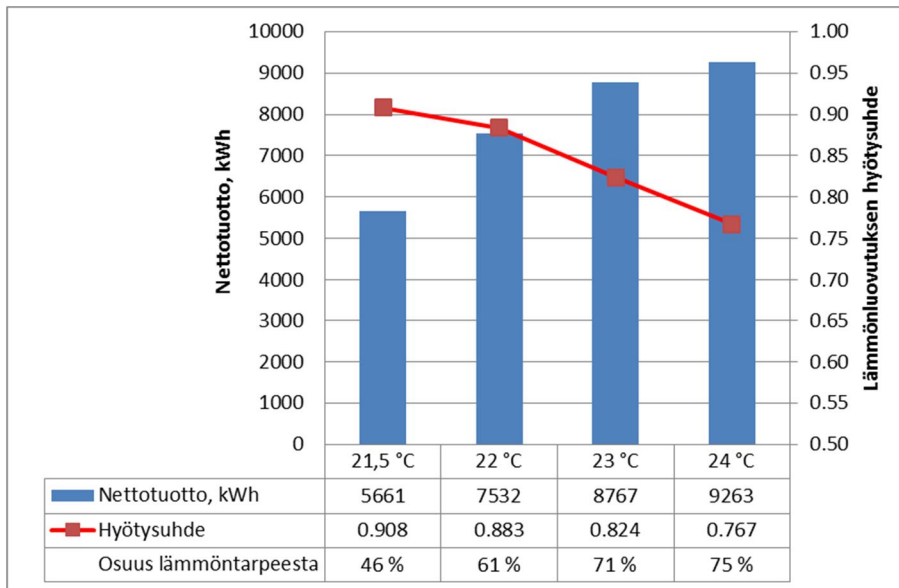


Kuva C3. Realististen ilmalämpöpumppujen keskimääräinen vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.



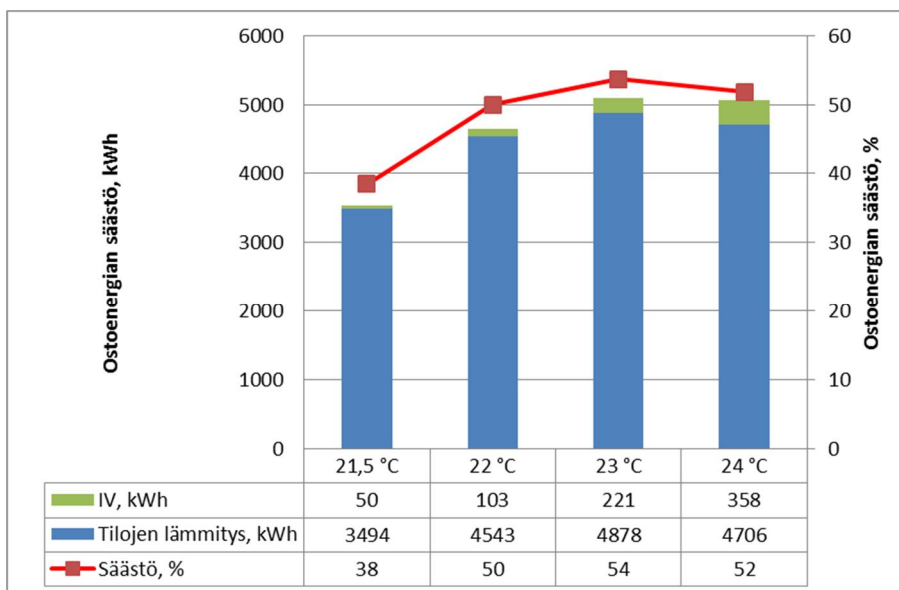
Kuva C4. Ala- ja yläkerran realististen ilmalämpöpumppujen vuosilämpökertoimet, joissa ei ole otettu huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta.

Seuraavassa kuvassa (kuva C5) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva C2) ilmalämpöpumppujen nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



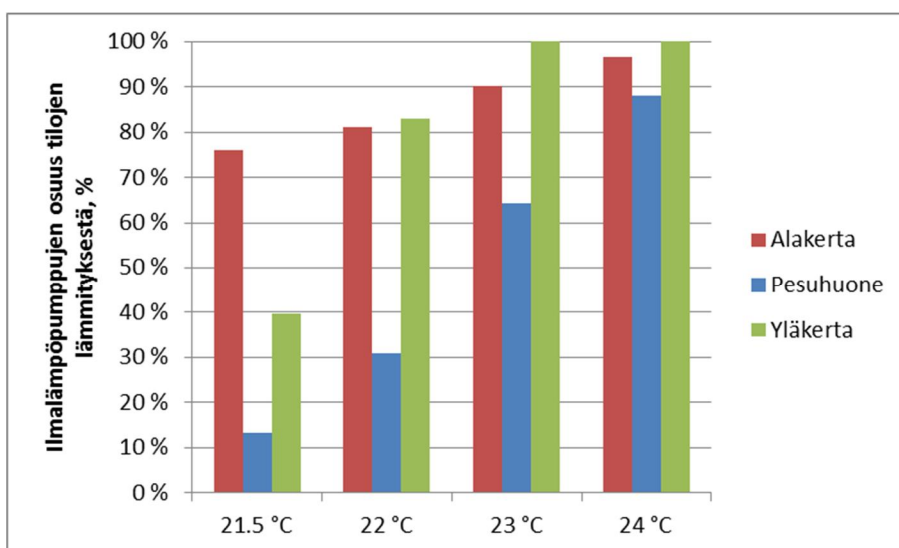
Kuva C5. Realististen ilmalämpöpumppujen nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa C6 on esitetty ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumppua laskettuun vertailukulutukseen. Suurin säästö saavutetaan ilmalämpöpumppujen asetusarvolla +23 °C.



Kuva C6. Realististen ilmalämpöpumppujen ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

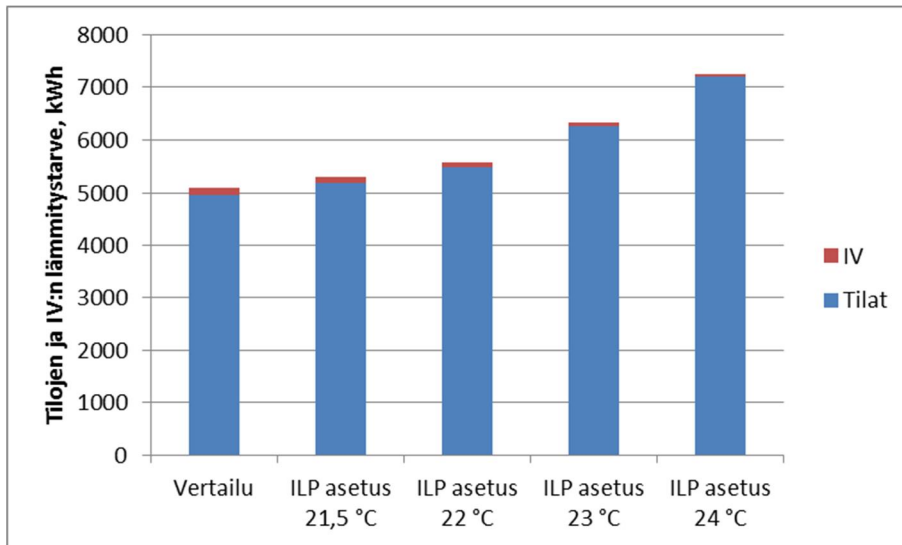
Kuvassa C7 on havainnollistettu lämmön jakautumista kerroksittain. Kuvasta nähdään, että yläkerrassa ilmalämpöpumpulla voidaan kattaa lähes koko lämmitystarve. Alakerrassa tarvitaan jonkin verran lisälämmitystä, mikä johtuu lähinnä pesuhuoneen lämmöntarpeesta.



Kuva C7. Realististen ilmalämpöpumppujen osuus tilojen lämmityksestä alakerrassa, erikseen alakerran pesuhuoneessa ja yläkerrassa nykyisten määräysten mukaisessa rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

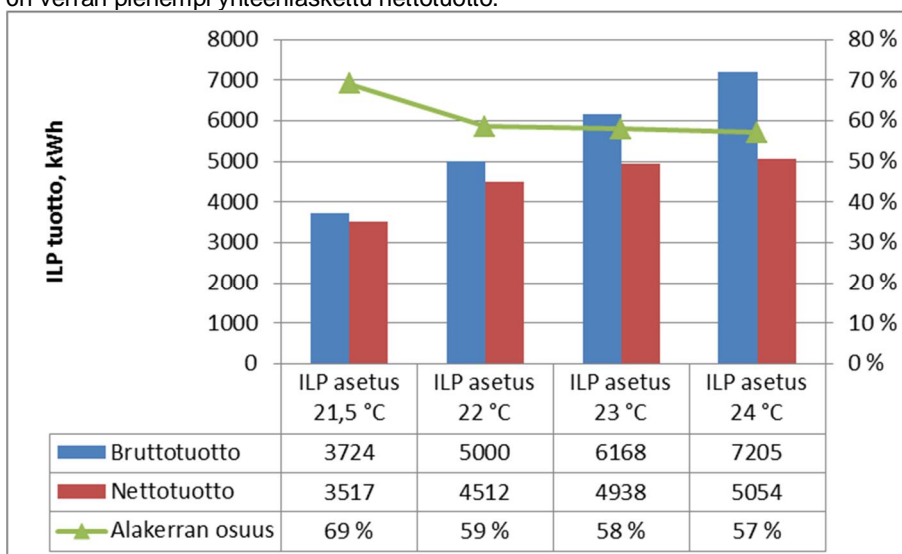
Liite D: Tulokset passiivitason (lähes nollaenergia) kaksikerroksisella rakennuksella ja realistisella sekä ala- että yläkertaan asennetulla ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva D1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumppua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Laskennassa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



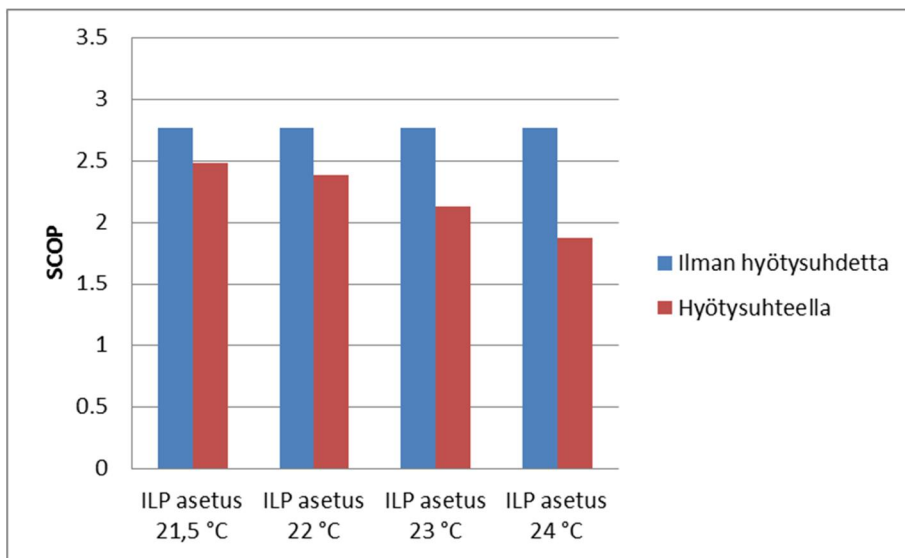
Kuva D1. Passiivitason rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realististen ilmalämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpuilla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä johtuen. Kuvassa D2 on esitetty sekä ilmalämpöpumppujen yhteenlaskettu bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetyin lisälämpöhäviöin verran pienempi yhteenlaskettu nettotuotto.

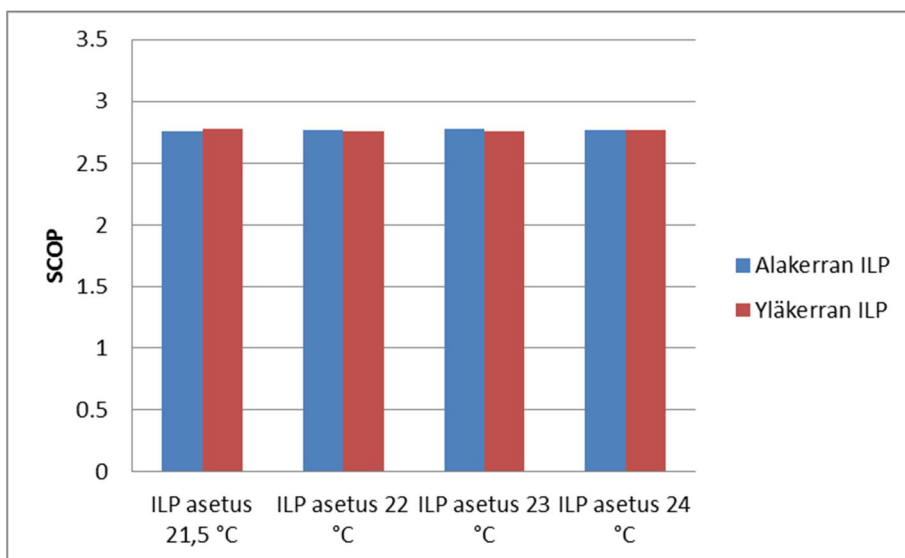


Kuva D2. Realististen ilmalämpöpumppujen yhteenlaskettu vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto passiivitason rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumppujen käyttö tässä tarkastelussa lisää lämpöhäviöitä, on määräyksiä ajatellen määritetty myös lämpöpumppujen keskimääräinen vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva D3 ja kuva D4.

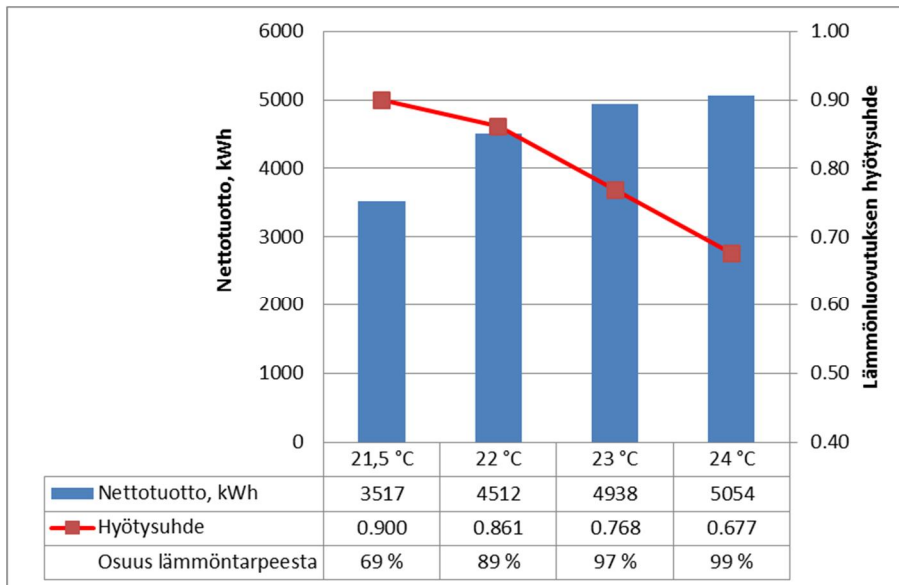


Kuva D3. Realististen ilmalämpöpumppujen keskimääräinen vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdeta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon passiivitason rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.



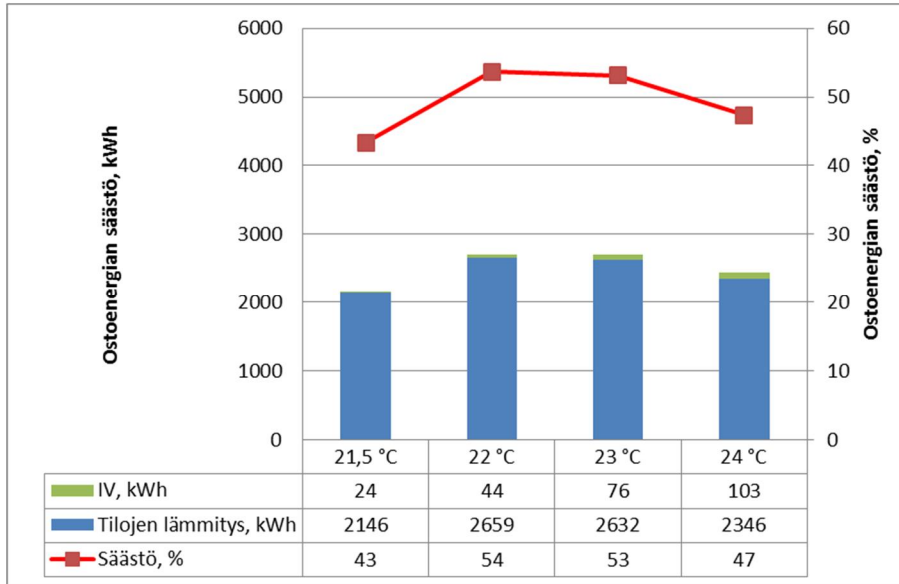
Kuva D4. Ala- ja yläkerran realististen ilmalämpöpumppujen vuosilämpökertoimet, joissa ei ole otettu huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdeta.

Seuraavassa kuvassa (kuva D5) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva D2) ilmalämpöpumppujen nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



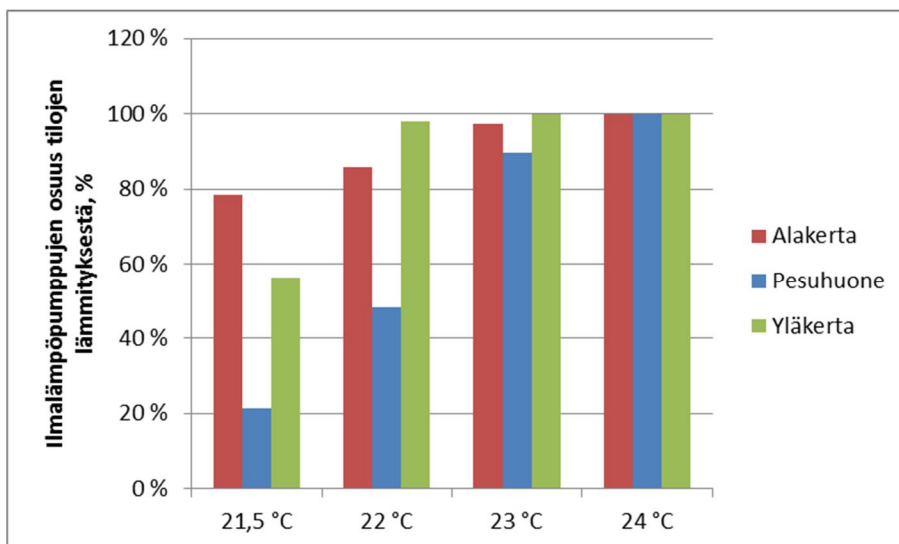
Kuva D5. Realististen ilmalämpöpumppujen nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde passiivitason rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa D6 on esitetty ostoenergian säästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumppua laskettuun vertailukulutukseen. Tuloksista havaitaan, että maksimisäästö saavutetaan ilmalämpöpumppujen huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.



Kuva D6. Realististen ilmalämpöpumppujen ostoenergiesäästö ja sen jakautuminen tilojen ja ilmanvaihdon osuuksiin sekä ostoenergiesäästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta passiivitason rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

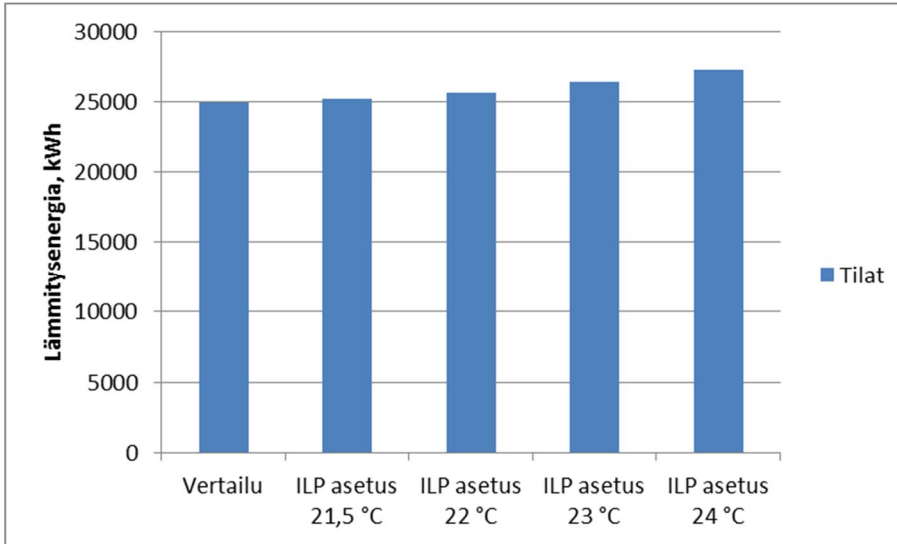
Kuvassa D7 on havainnollistettu lämmön jakautumista kerroksittain. Kuvasta nähdään, että yläkerrassa ilmalämpöpumpulla voidaan kattaa lähes koko lämmitystarve. Alakerrassa tarvitaan jonkin verran lisälämmitystä, mikä johtuu lähinnä pesuhuoneen lämmöntarpeesta.



Kuva D7. Realististen ilmalämpöpumppujen osuus tilojen lämmityksestä alakerrassa, erikseen alakerran pesuhuoneessa ja yläkerrassa passiivitason rakennuksessa lämpöpumppujen huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

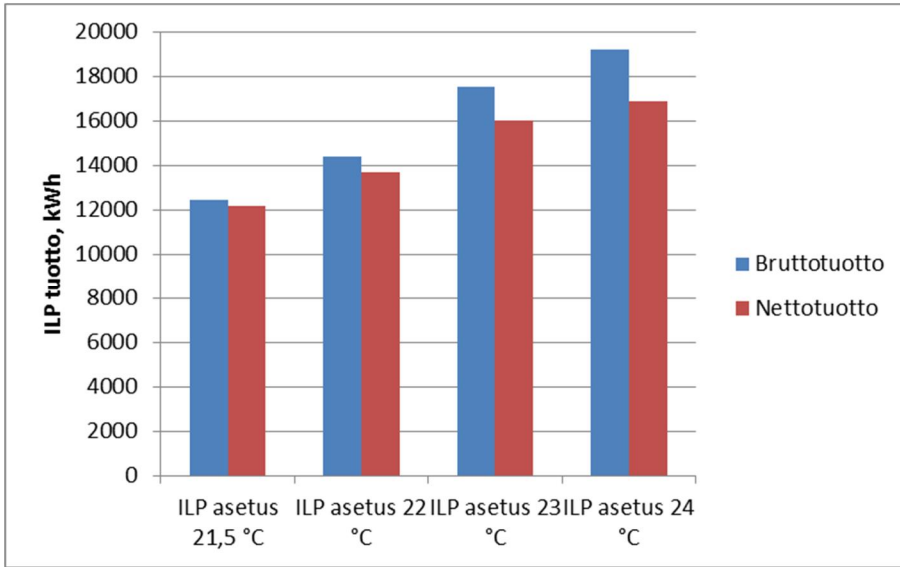
Liite E: Tulokset vanhalla yksikerroksisella rakennuksella ja realistisella ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva E1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumppua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Laskennassa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



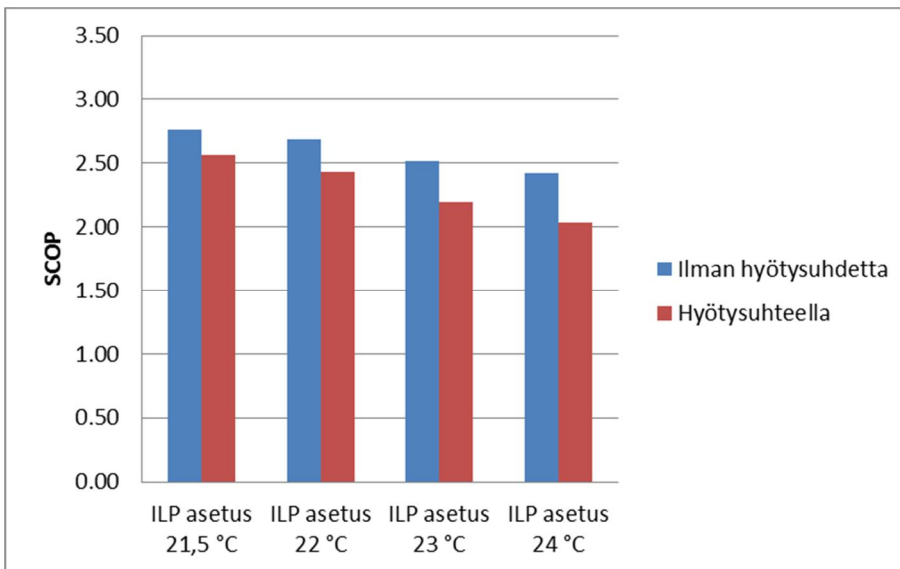
Kuva E1. Tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realistisen ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpuilla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä johtuen. Kuvassa E2 on esitetty sekä ilmalämpöpumpun bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetyn lisälämpöhäviön verran pienempi nettotuotto.



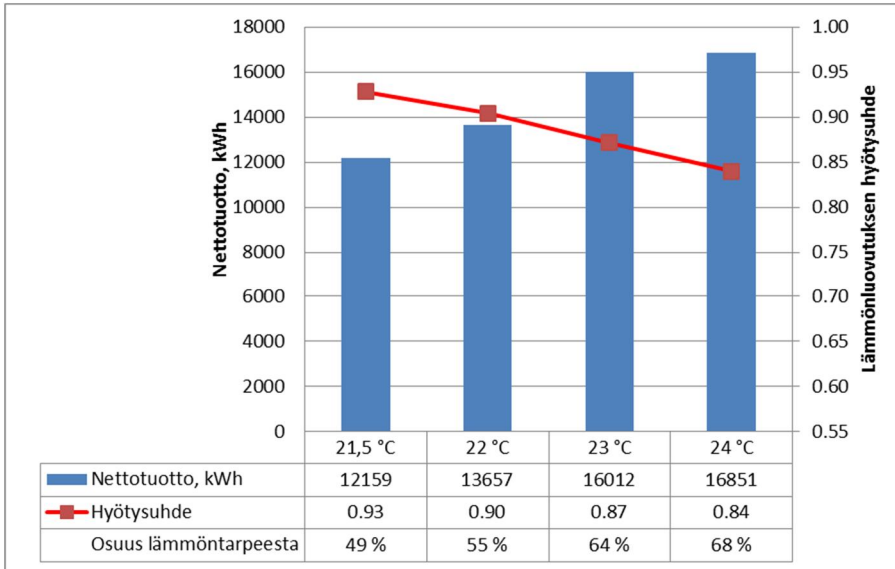
Kuva E2. Realistisen ilmalämpöpumpun vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumpun käyttö lisää lämpöhäviöitä, on määräyksiä ajatellen määritetty myös lämpöpumpun keskimääräinen vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva E3.



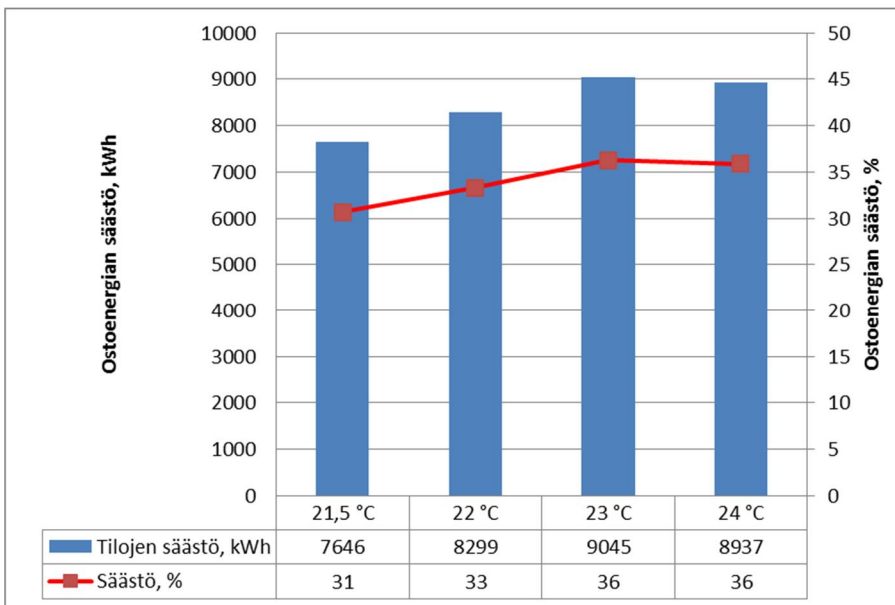
Kuva E3. Realistisen ilmalämpöpumpun vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Seuraavassa kuvassa (kuva E4) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva E2) ilmalämpöpumpun nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



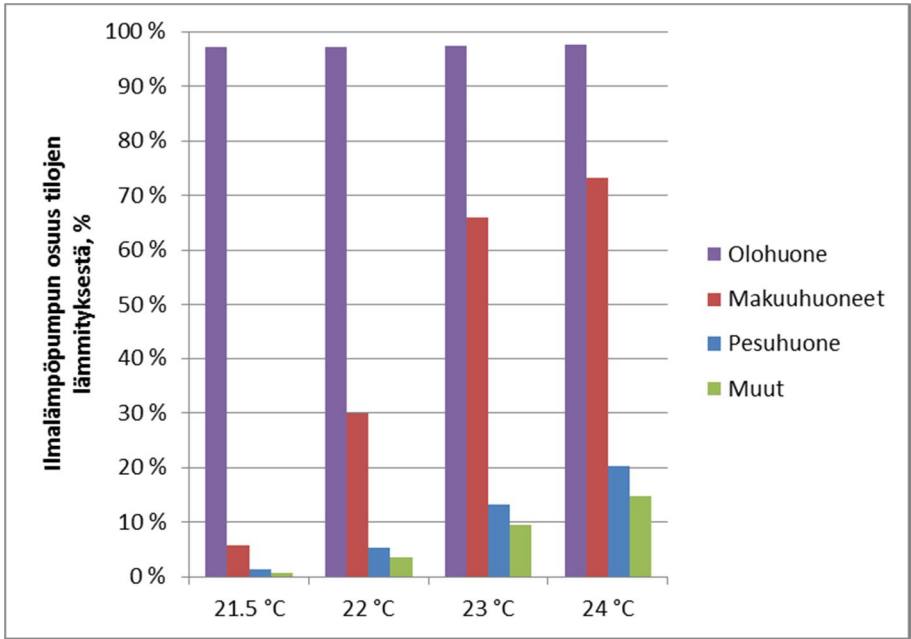
Kuva E4. Realistisen ilmalämpöpumpun nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluvutuksen kokonaishyötysuhde vanhassa rakennuksessa ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa E5 on esitetty ostoeenergian säästö sekä ostoeenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumpua laskettuun vertailukulutukseen. Tuloksista havaitaan, että maksimisäästö saavutetaan ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.



Kuva E5. Realistisen ilmalämpöpumpun ostoenergiansäästö sekä ostoenergiansäästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta vanhassa rakennuksessa ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

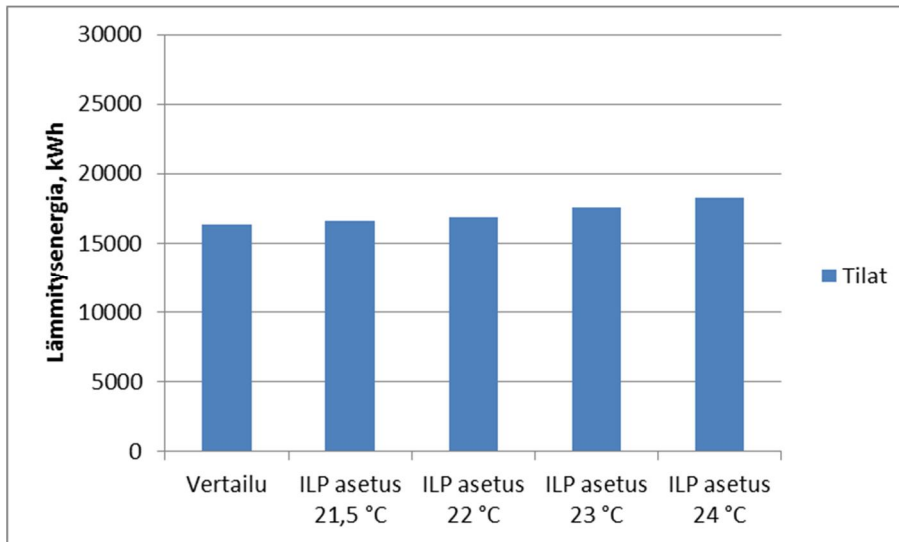
Kuvassa E6 on havainnollistettu lämmön jakautumista huoneryhmittäin. Kuvasta nähdään, että ilmalämpöpumpulla voidaan kattaa olohuoneen lähes koko lämmitystarve. Makuuhuoneissa ja muissa tiloissa tarvitaan lisälämmitystä.



Kuva E6. Realistisen ilmalämpöpumpun osuus tilojen lämmityksestä vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

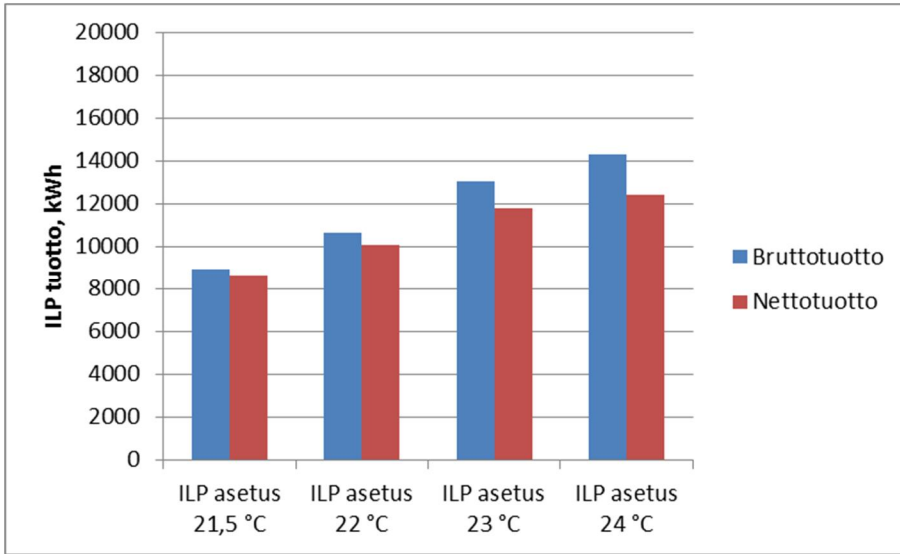
Liite F: Tulokset peruskorjatulla yksikerroksisella rakennuksella ja realistisella ilmalämpöpumpulla Helsingin ilmastossa

Rakennuksen tilojen lämmitysenergiankulutus kasvaa (kuva F1) käytettäessä ilma-ilmalämpöpumppua, koska ilmalämpöpumpulla pidetään yllä korkeampaa huonelämpötilaa kuin varsinaisella lämmitysjärjestelmällä. Lasketuissa tapauksissa varsinaisella lämmitysjärjestelmällä (huonekohtaiset sähköpatterit) ylläpidetään kaikissa muissa tiloissa +21 °C huonelämpötilaa paitsi pesuhuoneessa, jossa asetusarvo on +22 °C.



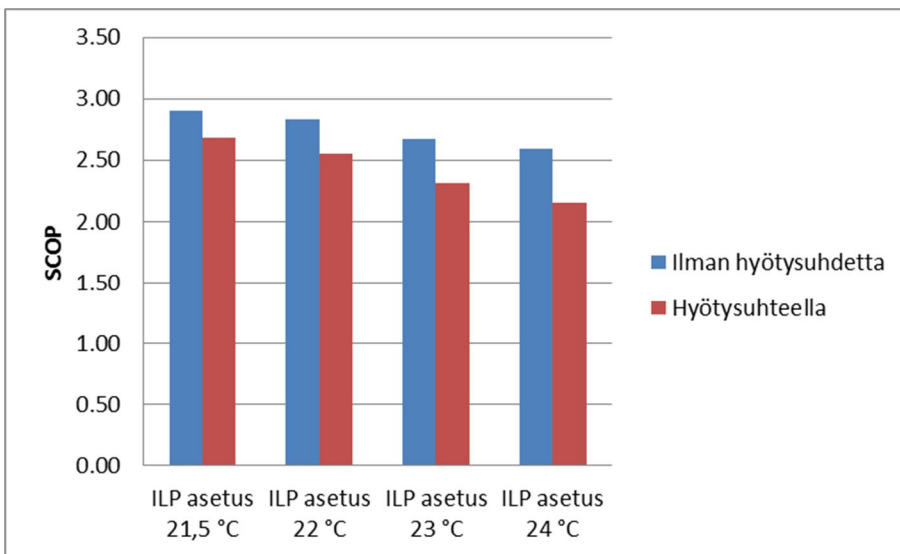
Kuva F1. Tilojen ja ilmanvaihdon vuotuinen lämmitysenergiankulutus realistisen ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetuksilla.

Ilma-ilmalämpöpumpuilla tuotetusta kokonaislämpöenergiasta (bruttotuotto) osa menee hukkaan korkeamman sisälämpötilan ylläpidon aiheuttamista lisääntyneistä lämpöhäviöistä johtuen. Kuvassa F2 on esitetty sekä ilmalämpöpumpun bruttotuotto että bruttotuotosta vähennetyn lisälämpöhäviön verran pienempi nettotuotto.



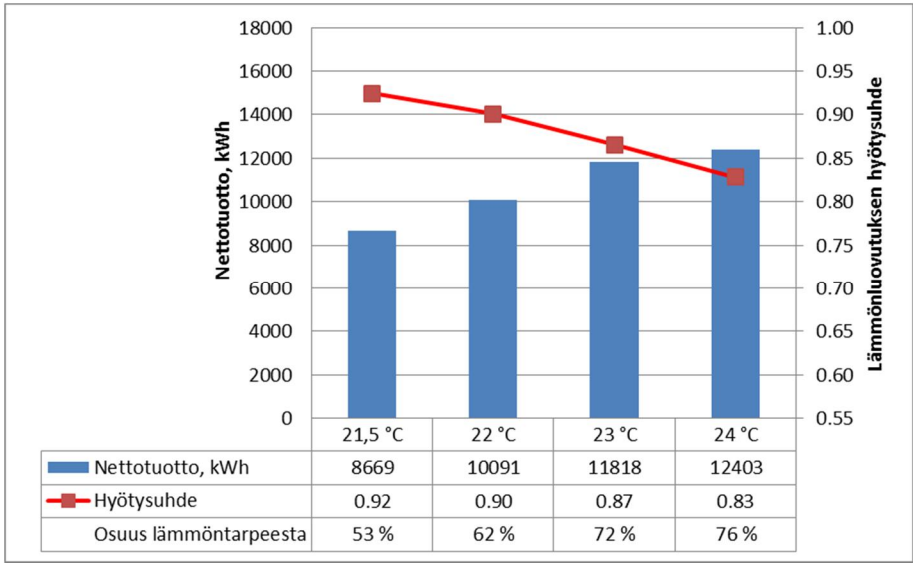
Kuva F2. Realistisen ilmalämpöpumpun vuotuinen brutto- ja nettolämmöntuotto vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla. Bruttotuotossa ei ole otettu huomioon lämpötilan kerrostuman hyötysuhdetta $\eta_{\text{kerrostuma}}$.

Perinteisesti ilma-ilmalämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin määritetään edellä esitetyn ilmalämpöpumpun vuotuisen bruttotuoton ja sähkönkulutuksen suhteena. Koska ilmalämpöpumpun käyttö lisää lämpöhäviöitä, on määräyksiä ajatellen määritetty myös lämpöpumpun keskimääräinen vuosilämpökerroin, joka ottaa huomioon lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhteen, kuva F3.



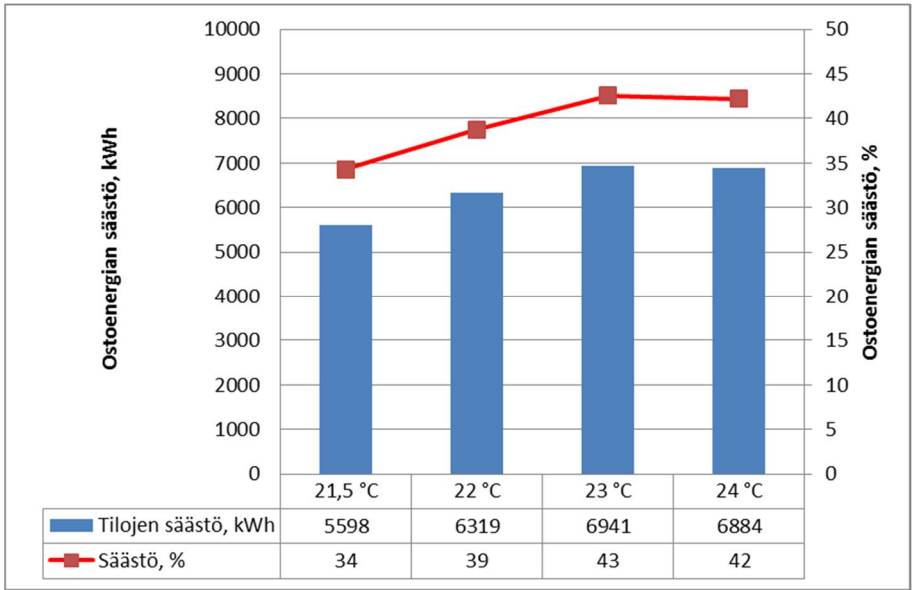
Kuva F3. Realistisen ilmalämpöpumpun vuosilämpökerroin (SCOP) ilman lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhdetta sekä kun hyötysuhde on otettu huomioon vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Seuraavassa (kuva F4) on esitetty tarkemmin aiemmin esillä ollut (kuva F2) ilmalämpöpumppujen nettotuotto, sen osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta sekä lisäksi lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde.



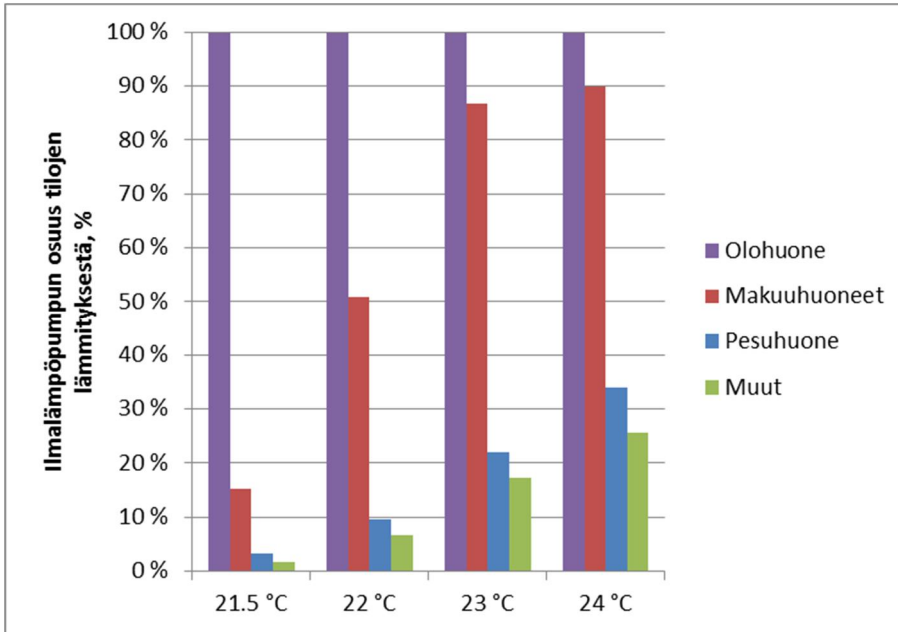
Kuva F4. Realistisen ilmalämpöpumpun nettolämmöntuotto, nettotuoton osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta ja lämmönluovutuksen kokonaishyötysuhde vanhassa rakennuksessa ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa F5 on esitetty ostoeenergian säästö sekä ostoeenergian säästö prosentteina verrattuna ilman lämpöpumpua laskettuun vertailukulutukseen. Tuloksista havaitaan, että maksimisäästö saavutetaan ilmalämpöpumpun huonelämpötilan asetusarvolla +22 °C.



Kuva F5. Realistisen ilmalämpöpumpun ostoenergiansäästö sekä ostoenergiansäästön osuus tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta vanhassa rakennuksessa ilmalämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Kuvassa F6 on havainnollistettu lämmön jakautumista huoneryhmittäin. Kuvasta nähdään, että ilmalämpöpumpulla voidaan kattaa olohuoneen lähes koko lämmitystarve. Makuuhuoneissa ja muissa tiloissa tarvitaan lisälämmitystä.



Kuva F6. Realistisen ilmalämpöpumpun osuus tilojen lämmityksestä vanhassa rakennuksessa lämpöpumpun huonelämpötilan eri asetusarvoilla.

Liite G: Esimerkki ilma-ilmalämpöpumpun maksimituoton ja sitä vastaavan SCOP-arvon laskennasta

Seuraavassa esimerkissä havainnollistetaan, kuinka suuri ilma-ilmalämpöpumpun lämmöntuotto voi olla, kun ilma-ilmalämpöpumppu asennetaan suureen tilaan, jonka lämmöntarve on huomattavan suuri verrattuna ilma-ilmalämpöpumpun tuottoon.

Ilma-ilmalämpöpumpun myyjän ilmoittamista energiamerkinnän taustatiedoista sekä laitteelle ilmoitetuista teknisistä tiedoista tai julkisista mittaustuloksista saadaan taulukossa G1 esitetyt tiedot. Koska esimerkissä haetaan ilma-ilmalämpöpumpun äärimmäistä maksimituottoa, on tärkeää, että laskennassa käytettävät lämmitystehon ja COP:n arvot on ilmoitettu lämpöpumpun maksimiteholla kyseisessä ulkoilman lämpötilassa.

Taulukko G1. Tarkasteltavan ilma-ilmalämpöpumpun teho ja COP eri ulkoilman lämpötiloilla.

Ulkoilman lämpötila, °C	ILPin lämmitysteho, kW	ILPin COP
+7 °C ⁽¹⁾	6,6 ⁽¹⁾	3,1 ⁽²⁾
-10 °C ⁽³⁾	4,0 ⁽³⁾	2,1 ⁽³⁾
-25 °C ⁽³⁾	2,6 ⁽³⁾	1,6 ⁽³⁾

⁽¹⁾ Laittevalmistajan esitteestä saatu maksimiteho (ei nimellisteho).

⁽²⁾ Tämä on saatu Energimyndighetenin julkaisemista mittaustuloksista (<http://www.energimyndigheten.se/>).

⁽³⁾ Nämä on saatu laittevalmistajan julkaisemasta energiamerkinnän tausta-aineistosta. Toimintapisteet on valittu siten, että tiedot luultavimmin ovat ainakin lähellä laitteen 100 %:n tehoa kyseisissä ulkoilman lämpötiloissa. -10 °C on laittevalmistajan ilmoittama bivalenttilämpötila (bivalent temperature) ja -25 °C on toimittajan ilmoittama laitteen alin toimintalämpötila (operating limit temperature).

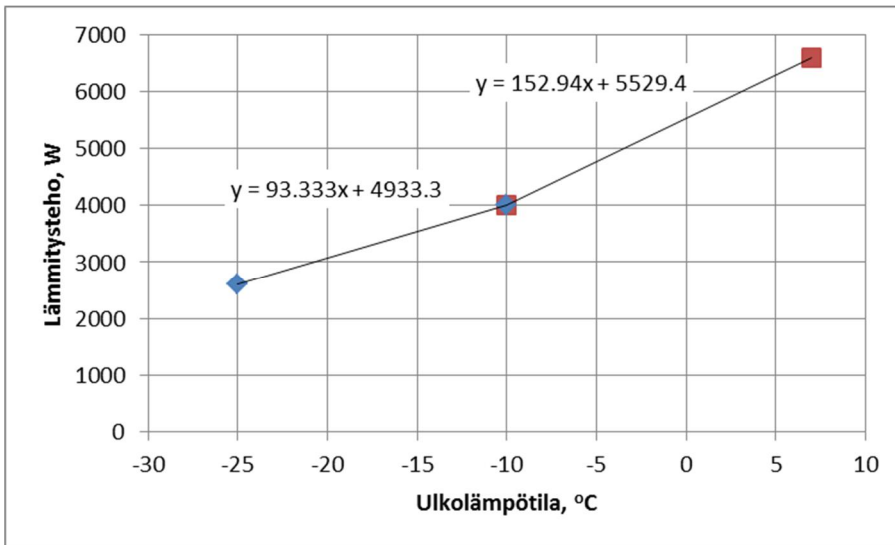
Energiamerkinnän osakuormituspisteiden (-7 °C, +2 °C, +7 °C ja +12 °C) toiminta-arvot eivät ole tässä tarkastelussa käyttökelpoisia, koska niille ilmoitetut tehon ja COP:n arvot vastaavat osakuormitustilanteita.

Ilmalämpöpumpun nettotuotto ja vuosilämpökerroin lasketaan soveltaen energiamerkintämääräystä (EU No 626/2011) ja standardia EN 14825:2012.

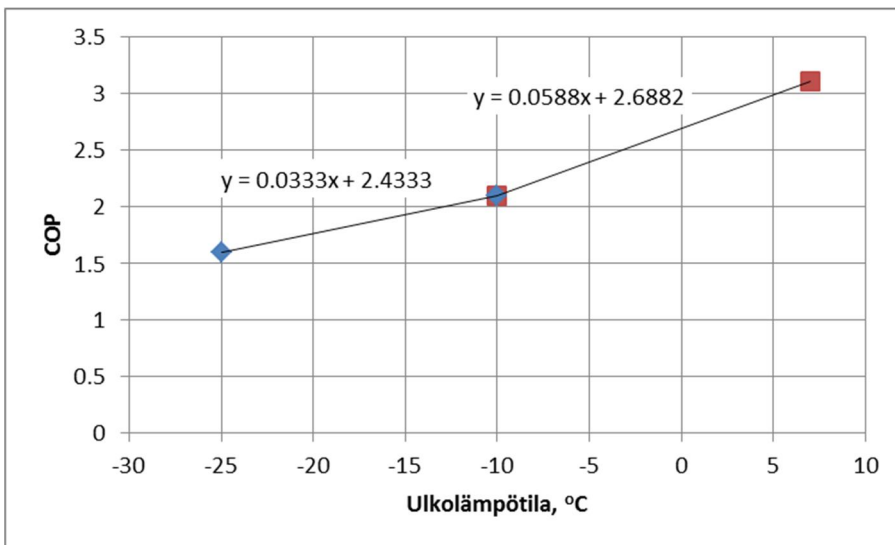
Kuvissa G1 ja G2 on esitetty taulukon G1 arvoilla määritetyt maksimituoton laskennassa käytetyt lineaariset interpolointisovitteet ilma-ilmalämpöpumpun lämmitysteholle ja COP-arvoille eri lämpötila-alueilla.

Taulukossa G2 on esitetty laskennan tulokset energiamerkintälaskennan (EU No 626/2011) mukaisissa, kylmälle ilmastolle määritellyissä olosuhteissa.

Tuloksista nähdään, että ilma-ilmalämpöpumpun maksimituotto on runsaat 37 MWh/a ja sitä vastaava vuosilämpökerroin SKOP = 2.8. Tosin maksimituottoon päästään vasta, kun rakennuksen lämmöntarve on runsaat nelinkertainen lämpöpumpun maksimituottoon verrattuna eli > 130 MWh/a. Ilmalämpöpumpun tuoton suhde rakennuksen lämmöntarpeeseen on esitetty kuvassa G3.



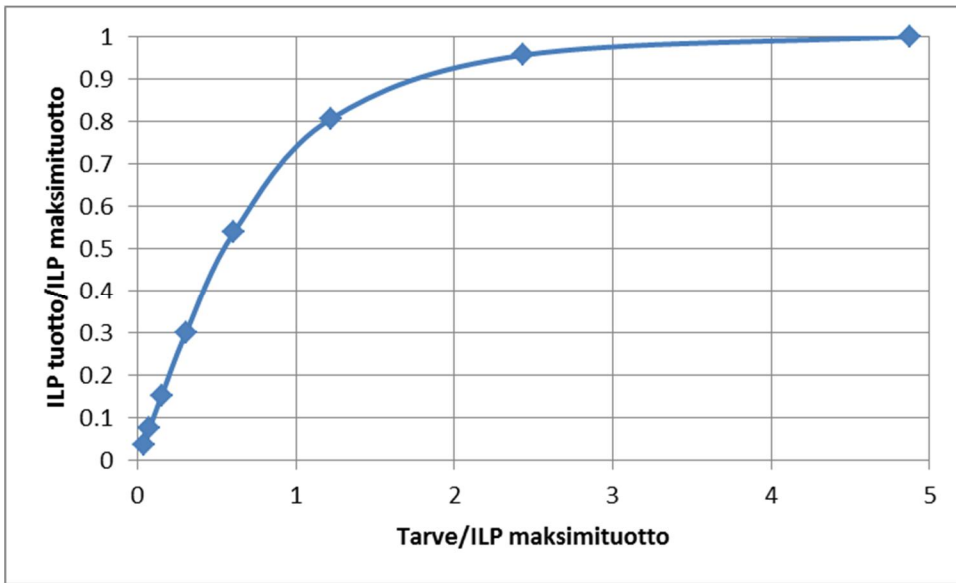
Kuva G1. Ilma-ilmalämpöpumpun lämmitysteheho (taulukko G1) ulkoilman lämpötilan funktiona sekä interpoloinneissa ja ekstrapoloinnissa käytetyt lineaariset sovitteet.



Kuva G2. Ilma-ilmalämpöpumpun COP (taulukko G1) ulkoilman lämpötilan funktiona sekä interpoloinneissa ja ekstrapoloinnissa käytetyt lineaariset sovitteet.

Taulukko G2. Esimerkkilaskelma todellisen ilma-ilmalämpöpumpun maksimituotosta ja sitä vastaavasta vuosilämpökertoimesta.

Bin	Lämpötila	Kylmä ilmasto tunnit		ILP lämpöteho kW	ILP energia kWh	COP	ILP sähköteho kW	ILP sähköenergia kWh
9	-22	1		2.88	2.88	1.70	1.69	1.69
10	-21	6		2.97	17.84	1.73	1.71	10.29
11	-20	13		3.07	39.87	1.77	1.74	22.56
12	-19	17		3.16	53.72	1.80	1.75	29.83
13	-18	19		3.25	61.81	1.83	1.77	33.71
14	-17	26		3.35	87.01	1.87	1.79	46.60
15	-16	39		3.44	134.16	1.90	1.81	70.59
16	-15	41		3.53	144.87	1.93	1.83	74.91
17	-14	35		3.63	126.93	1.97	1.84	64.53
18	-13	52		3.72	193.44	2.00	1.86	96.70
19	-12	37		3.81	141.09	2.03	1.88	69.38
20	-11	41		3.91	160.17	2.07	1.89	77.49
21	-10	43		4.00	172.00	2.10	1.90	81.90
22	-9	54		4.15	224.26	2.16	1.92	103.87
23	-8	90		4.31	387.53	2.22	1.94	174.74
24	-7	125		4.46	557.35	2.28	1.96	244.82
25	-6	169		4.61	779.39	2.34	1.97	333.73
26	-5	195		4.76	929.12	2.39	1.99	388.07
27	-4	278		4.92	1367.10	2.45	2.00	557.32
28	-3	306		5.07	1551.60	2.51	2.02	617.72
29	-2	454		5.22	2371.48	2.57	2.03	922.54
30	-1	385		5.38	2069.94	2.63	2.04	787.23
31	0	490		5.53	2709.41	2.69	2.06	1007.89
32	1	533		5.68	3028.69	2.75	2.07	1102.54
33	2	380		5.84	2217.41	2.81	2.08	790.29
34	3	228		5.99	1365.31	2.86	2.09	476.62
35	4	261		6.14	1602.84	2.92	2.10	548.28
36	5	279		6.29	1756.05	2.98	2.11	588.85
37	6	229		6.45	1476.37	3.04	2.12	485.49
38	7	269		6.60	1775.39	3.10	2.13	572.74
39	8	233		6.75	1573.43	3.16	2.14	498.14
40	9	230		6.91	1588.35	3.22	2.15	493.67
41	10	243		7.06	1715.29	3.28	2.15	523.56
42	11	191		7.21	1377.44	3.34	2.16	413.03
43	12	146		7.36	1075.24	3.39	2.17	316.83
44	13	150		7.52	1127.64	3.45	2.18	326.61
45	14	97		7.67	744.04	3.51	2.18	211.89
46	15	61		7.82	477.23	3.57	2.19	133.67
Yhteensä		6446.00			37183.72			13300.32
SCOP _{on}		2.80						
SCOP		2.80						



Kuva G3. Ilma-ilmalämpöpumpun tuoton ja lämmitystarpeen välinen riippuvuus. Tarve on rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämpöenergian tarve sillä alueella, jota ilmalämpöpumppu palvelee.

Liite H: Ilma-ilmalämpöpumpun IDA-ICE-malli

IDA-ICE-simulointiohjelmiston versioissa 4.6 ja 4.7 beta on vakiona ilma-ilmalämpöpumpun malli. Malli perustuu höyrystys- ja lauhdutuslämmönsiirtimien mitoittamiseen fysikaalisten lähtötietojen perusteella. Tarvittavat lähtötiedot ovat lämpöpumpun mitoituslämmitysteho, höyrystimen ja lauhduttimen toisiopuolen ilmavirtauksien lämpötilat sekä logaritmiset lämpötilaerot.

Ongelmalliseksi höyrystimen ja lauhduttimen logaritmisten lämpötilaerojen määrittämisen tekee se, että höyrystys- ja lauhdutuslämpötilat eivät ole tiedossa eikä valmistaja julkaise niitä teknisissä tiedoissa. Tästä johtuen logaritmiset lämpötilaerot täytyy laskea asiantuntija-arvion perusteella.

Höyrystimen ja lauhduttimen fysikaalisista lämmönsiirrinmalleista on laskettavissa höyrystys- ja lauhdutuslämpötilat muissa ympäristön olosuhteissa kuin mitoitusilanteessa, esimerkiksi höyrystyslämpötila ulkoilman vaihtelevissa lämpötiloissa.

Kun höyrystys- ja lauhdutuslämpötilat tietyssä tilanteessa tunnetaan, IDA-ICE:n malli laskee vastaavan höyrystimen jäähdytystehon ja sähkötehon eksponenttifunktioista, kaavat 9 ja 10:

$$\dot{Q}_{\text{höyrystin}} = A * e^{B * t_h} * e^{C * t_l} \quad (10)$$

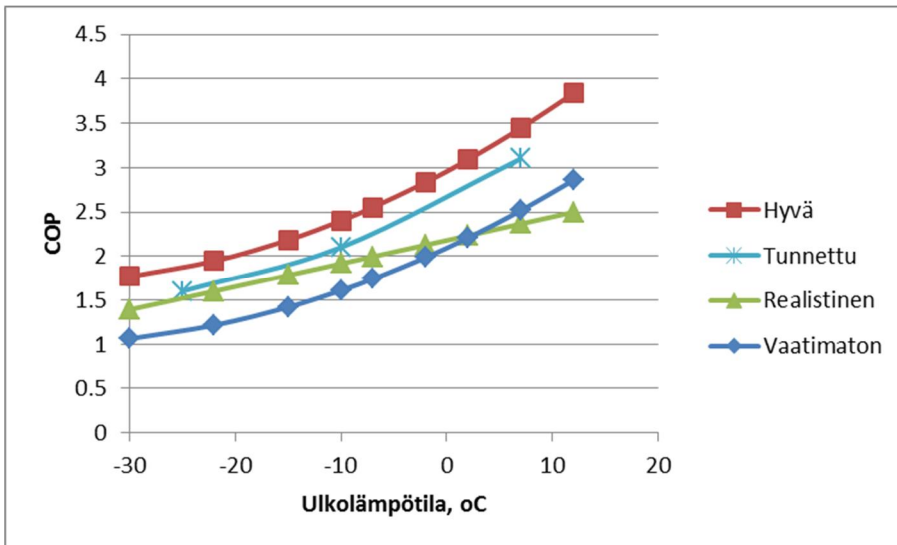
$$P_{\text{sähkö}} = D * e^{E * t_h} * e^{F * t_l} \quad (11)$$

joissa

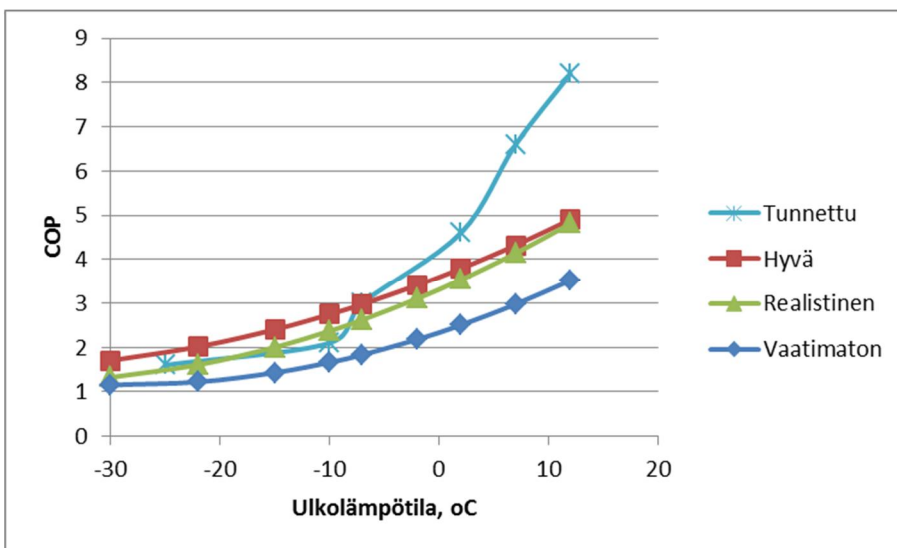
$\dot{Q}_{\text{höyrystin}}$	on höyrystimen jäähdytysteho, W
$P_{\text{sähkö}}$	on ilma-ilmalämpöpumpun sähköteho, W
t_h	on höyrystyslämpötila, °C
t_l	on lauhdutuslämpötila, °C
A, B, C, D, E ja F	ovat parametreja.

Parametrit A, B, C, D ja F viritetään niin, että mallilla lasketut arvot (lämmitysteho ja COP) vastaavat valmistajan ilmoittamia arvoja mahdollisimman hyvin.

Parametrien virittäminen "yritys ja erehdys" -menetelmällä osoittautui varsin haastavaksi, eikä virityksessä onnistuttu niin, että malli toimisi oikein kaikissa olosuhteissa. Lisäksi valmistajan ilmoittamat ja Energimyndighetenin sekä Scanofficen julkaisemat tiedot ovat varsin rajalliset ja siten vaikeuttavat mallin virittämistä. Kuvissa H1 ja H2 esitetään laskennassa käytettyjen mallien toimintaa verrattuna tiedossa olleeseen ai-neistoon.



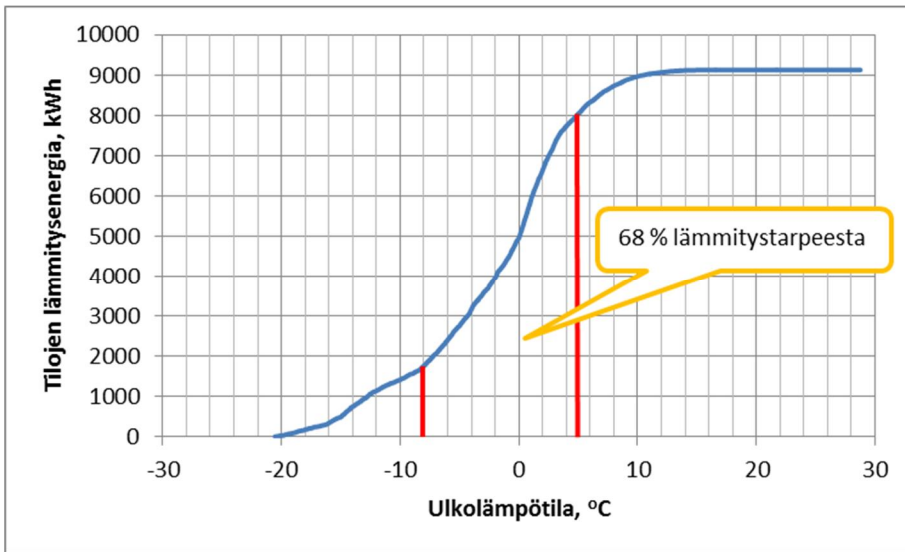
Kuva H1. Laskentamallien COP-arvojen vertailua tunnettuun aineistoon, kun ilma-ilmalämpöpumppu toimii kaikissa ulkoilmaolosuhteissa täydellä teholla (100 %).



Kuva H2. Laskentamallien COP-arvojen vertailua tunnettuun aineistoon, kun ilma-ilmalämpöpumppu toimii vaihtelevissa osakuormitusolosuhteissa riippuen ulkoilman lämpötilasta.

Täyden teho vertailussa (kuva H1) havaitaan, että hyvä ja vaatimaton malli käyttäytyvät samankaltaisesti kuin tunnettu laite. Sen sijaan realistinen malli poikkeaa käytökseltään muista. Osakuormituksella (kuva H2) mikään laskentamalleista ei toimi hyvin, kun ulkoilman lämpötila on korkeampi kuin noin -5 °C. Jonkin verran muita malleja paremmin toimii realistinen malli.

Vuosilämpökertoimen kannalta merkityksellisin ulkolämpötila-alue osuu Helsingin säällä (kuva H3) -8 °C ja +5 °C väliin. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että malleilla lasketut tulokset antavat ilmeisesti jossain määrin varovaisen arvion vuosilämpökertoimesta.



Kuva H3. Laskennassa käytetyn, nykymääräysten mukaisen kaksikerroksisen rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon kumulatiivinen lämmitysenergiatarve Helsingin sääolosuhteissa.

Nimeke	Ilma-ilmalämpöpumppujen energiankulutusvaikutukset pientaloissa
Tekijä(t)	Ari Laitinen
Tiivistelmä	<p>Hankkeessa selvitettiin ilma-ilmalämpöpumppujen energiansäästöpotentiaalia ja uusiutuvan energian käyttöä laskennallisella tarkastelulla. Tarkastelun reunaehtoina olivat rakennuksen lämmöntarve, ilma-ilmalämpöpumpun lämmönluovutusominaisuudet ja ilma-ilmalämpöpumpun käyttötapa eli lämpöpumpun lämpötilan asetusrvo. Energiansäästöt määritettiin kahdella eri pientalotyypillä ja neljällä eri lämmöntarvetasolla. Toinen tarkastelluista talotyypeistä oli nykymääräysten mukainen kaksikerroksinen pientalo, jolla tarkasteltiin kahta eri energiankulutustasoa. Toinen yksikerroksinen talotyyppi edusti vanhaa rakennuskantaa, ja silläkin tarkasteltiin kahta eri energiankulutustasoa</p> <p>Ilma-ilmalämpöpumppujen mallinnuksessa käytettiin IDA-ICE-simulointiohjelmistoa, jonka parametrit pyrittiin viritämään niin, että lämpöpumpun lämmitysteho ja COP eri olosuhteissa vastaisivat mittauksia. Mittaustietoina käytettiin Scanoffice Oy:n internetsivuillaan julkaisemia mittaustietoja sekä ruotsalaisen Energimyndighetenin sivuillaan julkaisemia mittaustuloksia.</p> <p>Laskennallisten tulosten perusteella ilma-ilmalämpöpumput kattoivat rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmöntarpeesta tarkastelluissa rakennuksissa 50–60 % yhdellä lämpöpumpulla. Kaksikerroksisissa rakennuksissa kahdella lämpöpumpulla katettiin noin 90 % lämmöntarpeesta. Nykyistä hyvää tasoa edustavilla, ilma-ilmalämpöpumpuilla vuosilämpökertoimet (otettu huomioon ilmalämpöpumpun sisäyksikön melukriteeri: asuinhuoneen äänenpainetaso täytyy olla alle 28 dB), olivat suuruusluokaltaan noin 2,8–3,4. Määräysten mukainen melukriteeri rajoittaa sisäyksikön ilmavirtauksen noin puoleen maksimivirtauksesta. Kun ilmalämpöpumpun vuosikertoimessa otetaan lisäksi huomioon lämmönluovutuksen hyötysuhde, päädytään vuosikertoimen arvoihin 2,3–3,0.</p> <p>Raportissa on esitetty kaksi yksinkertaista laskennallista tapaa määrittää ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto. Yksinkertaisimmin ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto lasketaan 40 %:n osuuden mukaan rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon energiantarpeesta. Toisessa menetelmässä nettotuotto lasketaan ilmalämpöpumpun vaikutuspiirin pinta-alan perusteella. Kummassakin menetelmässä vuosilämpökertoimenä (SCOP) suositellaan käytettävän ilma-ilmalämpöpumpun energiamerkinnän arvoa kylmälle ilmastovyöhykkeelle. Ilma-ilmalämpöpumpun maksimituotto ehdotetaan rajoitettavaksi energiamerkinnän tiedoista laskettavaan vuotuisen lämmöntuottoon.</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8437-6 (URL: http://www.vtt.fi/julkaisut) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Verkkojulkaisu) http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8437-6
Julkaisu aika	Kesäkuu 2016
Kieli	Suomi, englanninkielinen tiivistelmä
Sivumäärä	47 s. + liitt. 31 s.
Projektin nimi	Ilma-ilmalämpöpumppujen lämmönluovutus ja vuosilämpökertoimet erilaisissa käyttötapaüksissa
Rahoittajat	Ympäristöministeriö, Suomen lämpöpumppuyhdistys ry, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy
Avainsanat	Ilma-ilmalämpöpumppu, energiansäästö, SCOP, simulointi
Julkaisija	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy PL 1000, 02044 VTT, puh. 020 722 111

Title	Air to air heat pumps and their impact on the heating energy consumption of the single family houses
Author(s)	Ari Laitinen
Abstract	<p>Air-to-air heat pumps have been studied in the Finnish climate in order to clarify their real energy saving potential as well as in old, present and tomorrow's nearly zero energy detached houses. IDA-ICE software has been used in the simulations and the standard air-to-air heat pump model included in the simulation tool was verified and tuned with the measured data published by Scanoffice (Finland) and Energimyndigheten (Sweden) on their websites.</p> <p>Two different building layouts have been used in the simulations representing typical Finnish old and new building types. The old house is one-storey building where air-to-air heat pump is located in rather open space consisting of living room and kitchen. The new building type is two-storeyed where heat pump is located either in the living room downstairs or both downstairs and upstairs in the hallway. Simulation results show that the heat production of an air-to-air heat pump covers 50–60% of the space and ventilation heating demand of the studied buildings. With two heat pumps, in case of the two-storey building, the coverage rate was about 90% of the heating demand. With present good air-to-air heat pumps the seasonal co-efficient of performance (SCOP) the calculated values were 2.8–3.4. These SCOP values include already the effect of the limitation of the fan speed of the indoor air unit due to the sound pressure level limitations in our building regulation. The sound pressure level should not be higher than 28 dB in living rooms. When the heat emission efficiency of the heat pump is also taken into account in the SCOP values, the seasonal factors were 2.3–3.0.</p> <p>The report includes two simple methods to calculate the net heat production of the air-to-air heat pump. The simplest way to calculate the net heat production is to assume that 40% of the space and ventilation heating demand of the building is covered by the heat pump. The other method is based on the calculation of the coverage floor area of the heat pump. This coverage floor area is calculated as the floor area of the zone where the heat pump is installed (open space bounded by the internal doors) plus 10% of the floor area of the rest of the building. Then the heat production is calculated by multiplying this coverage area by the specific heating demand of the building (space and ventilation). The SCOP value in both methods is taken from the energy label. SCOP values only for the cold climate are valid. The net heat production calculated with the methods should not be higher than heat production calculated from the energy label data for cold climate (SCOP multiplied by the yearly electricity usage)</p>
ISBN, ISSN, URN	ISBN 978-951-38-8437-6 (URL: http://www.vttresearch.com/impact/publications) ISSN-L 2242-1211 ISSN 2242-122X (Online) http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8437-6
Date	June 2016
Language	Finnish, English abstract
Pages	47 p. + app. 31 p.
Name of the project	Energy saving potential and seasonal co-efficient of air-to-air heat pumps in different operation conditions
Commissioned by	Ministry of the Environment, Finnish Heat Pump Association, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd
Keywords	Air-to-air heat pump, energy saving, simulation, SCOP
Publisher	VTT Technical Research Centre of Finland Ltd P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland, Tel. 020 722 111

Ilma-ilmalämpöpumppujen energiankulutusvaikutukset pientaloissa

Energiankulutuksen vähentämiseksi vuoteen 2020 mennessä on EU-tasolla tehty ja tekeillä toimenpiteitä, jotka vaikuttavat rakennussektorilla kokonaisvaltaisesti sekä rakennustuotteisiin että rakentamiseen.

Kansallisten rakentamismääräysten kehitystyön pohjaksi toteutettiin yhdessä ympäristöministeriön ja Suomen lämpöpumppuyhdistyksen kanssa tutkimushanke, jossa arvioitiin luotettavilla menetelmillä ilma-ilmalämpöpumppujen toimivuutta erityisesti pientaloissa. Tämän projektin tavoitteina oli selvittää ilma-ilmalämpöpumppujen mahdollisuuksia hyödyntää uusiutuvaa energiaa pientaloissa ja määrittää reunaehdoja tälle hyödyntämiselle.

Projektissa selvitettiin ilma-ilmalämpöpumppujen käytön ja lämmitystehon vaikutusta lämmitystehokkuuteen ja lämmityshyötysuhteeseen. Tarkastelun reunaehtoina olivat rakennuksen lämmöntarve, ilma-ilmalämpöpumpun lämmönluovutusominaisuudet ja ilma-ilmalämpöpumpun käyttötapa eli lämpöpumpun lämpötilan asetusarvo.

Energiansäästöt määritettiin kahdella eri pientalotyypillä ja neljällä eri lämmöntarvetasolla. Raportissa on yksityiskohtaisten simulointitarkastelujen lisäksi esitetty yksinkertaiset menetelmät, joilla ilma-ilmalämpöpumpun nettotuotto ja vuosilämpökerroin voidaan määrittää.

ISBN 978-951-38-8437-6 (URL: <http://www.vtt.fi/julkaisut>)

ISSN-L 2242-1211

ISSN 2242-122X (Verkkojulkaisu)

<http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8437-6>