



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANNA-STIINA LUOMA
LÄMPÖPUMPUN TOIMINNAN VAIKUTUS RAKENNUKSEN
ENEGIANKULUTUKSEEN
Diplomityö

Tarkastajat:

Professori Asko Riitahuhta ja Professori Hannu Ahlstedt

Tarkastajat ja aihe hyväksytyt

Teknisten tieteiden tiedekuntaneuvoston kokouksessa 5.2.2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Anna-Stiina Luoma: Lämpöpumpun toiminnan vaikutus rakennuksen energiankulu-
tukseen

Diplomityö, 87 sivua, 11 liitesivua

Kesäkuu 2014

Pääaine: Tuotekehitys

Tarkastajat: Professori Asko Riitahuhta ja Professori Hannu Ahlstedt

Avainsanat: Lämpöpumppu, SPF-luku

Vuonna 2012 voimaan tulleet Ympäristöministeriön laatimat Rakennusmääräyskokoel-
mauudistukset *Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta D5* ja
Rakennusten energiatehokkuus D3 asettavat uudet määräykset energiatehokkaalle ra-
kentamiselle. Rakennuksen energiatehokkuutta kuvaa ostoenergian määrää kuvastava E-
luku. E-luvun laskennassa otetaan huomioon rakennuksen lämmitystehontarpeen ohella
lämmöntuottojärjestelmän tehokkuus. Lämmöntuoton tehon laskennassa otetaan huomi-
oon varastoinnin häviöt ja laitehyötysuhteet.

Tässä työssä määritetään Kaukora Oy:n ilma-vesilämpöpumppujen Jämä-Moon ja maa-
lämpöpumppujen Jämä Star vuotuinen lämpökerroin eli SPF-luku niin, että ne ovat
käyttökelpoisia E-luvun laskennassa. Tutkimuksessa tarkastellaan rakennusmääräyksen
D5 lähtökohtaa ja tarvetta sekä perehdytään lämpöpumpun teoriaan. Teoreettinen tar-
kastelu johtaa käytännön sovellutuksena lämpöpumppujen SPF-luvun laskentamalliin ja
E-luvun tarkasteluun. Soveltavassa osassa laskennallisen mallin tuloksia verrataan refe-
rensiskohteiden energiankulutuksen muutoksiin lämmitysmuodon vaihdon yhteydessä.

Työssä tehdyn SPF-luvun laskentaohjelman avulla laskettuja lukuja verrataan mittaus-
tietoihin perustuviin lukemiin, NIBE VPDIM 2.5 lämpöpumpun mitoitusohjelman lu-
kemiin sekä rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennan D5
SPF-luvun ohjearvoihin.

Tässä tutkimuksessa todettiin, että teoreettiset SPF-lukujen tarkastelumallit eroavat to-
teutuneista lämpöpumppujen SPF-luvuista. Tuloksissa havaittiin SPF-luvun rajauksen
merkitys, eri ratkaisumenetelmillä määritettyjen SPF-lukujen eroavaisuus ja SPF-
lukujen vaikutus rakennuksen laskennalliseen energiatehokkuuslukuun.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Materials Engineering

Anna-Stiina Luoma: Effect of the heat pump function to the energy consumption of a building

Master of Science Thesis, 87 pages, 11 Appendix pages

June 2014

Major: Product Development

Examiners: Professor Asko Riitahuhta ja Professor Hannu Ahlstedt

Keywords: heat pump, Seasonal Performance Factor

The national building code of Finland was renewed at 2012 to improve the energy efficiency of the buildings. Detailed instructions are given for calculation of power and energy needs for heating of buildings (D5) and energy efficiency of buildings (D3). Theoretical total energy consumption of a building is described with a computed E-index. This is the amount of total energy input per area in a building and this is weighted with fuel specific factors. System losses and conversions are included in the total energy consumption and the losses are computed with average system efficiencies.

Computing of the E-index is always complicated and especially in the cases where heat pumps are used to produce the heating energy to the buildings. There has been a lot of discussion of the basis how the SPF-factor (Seasonal Performance Factor) is computed. There is a large variation in the SPF-factors shown by the different equipment manufacturers and the values computed with the D5 model.

In this work air to water and ground source heat pumps have been studied. All studied equipment are Jämä (NIBE) heat pumps and Kaukora Oy has been a research partner in this work. SPF factors have been determined with three methods and the results have been compared. At first the SPF-factor has been computed theoretically using the calculation model behind the D5. In the second phase the SPF-factors were computed by using the heat pump manufacture NIBE's dimensioning program tool. These computed results were compared to experimental results and measurements from the pilot installations. All the results are following the same logical trends and the differences between the methods were smaller than expected.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kaukora Oy:lle. Työn ohjaajina toimivat professori Hannu Ahlstedt ja professori Asko Riitahuhta. Kaukora Oy:sta vastuuhenkilönä toimi Rami Aaltonen. Haluan kiittää kaikkia osapuolia yhteistyöstä.

Tampereella 20.5.2014

Anna-Stiina Luoma

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Rakennuksen energialaskenta	3
2.1	Energialaskennan tarve ja lähtökohta	3
2.2	E-luku energiatehokkuusmittarina	5
2.3	Energiamuotokerroin.....	9
2.4	Lämpöpumpun energialaskenta	10
3	Lämpöpumppu lämmönlähteenä.....	12
3.1	Carnot-prosessi.....	13
3.2	Höyryprosessi.....	16
3.3	Lämpöpumppuprosessin lämpökerroin eli COP-luku.....	20
3.4	Kylmäaine R404A.....	21
3.5	Lämmönkeruupiiri.....	23
4	Lämpöpumppujen SPF-luvun laskenta	27
4.1	Lämpöpumpun vuosihyötysuhde eli SPF-luku	27
4.2	Yksityiskohtainen laskentamenetelmä.....	32
4.2.1	Lämpötilavälit	34
4.2.2	Lämpötilakorjattu COP-luku	35
4.2.3	Lämpöpumpun anto- ja ottoteho.....	41
4.2.4	Lämpötilavälien painokertoimet.....	47
4.2.5	Tehomitoituspiste.....	47
4.2.6	Lisälämmitysenergia	49
4.2.7	Käyntiaika ja täydentävä lisälämmitysenergia	51
4.2.8	Lämpöpumpun anto- ja ottoenergia sekä SPF-luku.....	51
5	SPF-lukujen tarkastelu	52
5.1	Ilma-vesilämpöpumput	52
5.2	Maalämpöpumput	57
5.3	Mittausarvoihin perustuva SPF-luku.....	63
5.3.1	Ilma-vesilämpöpumppu sähkölämmityksen rinnalle (kohde A).....	63
5.3.2	Ilma-vesilämpöpumppu öljykattilan rinnalle (kohde B).....	64
5.3.3	Mittaustulokset kohteesta A ja B	65
6	SPF-luvun vaikutus E-lukuun	69
6.1	Ilma-vesilämpöpumppu referenssikohteessa A.....	69
6.2	Maalämpöpumppu referenssikohteessa A.....	71
7	Yhteenveto	73
	Lähteet.....	75
	Liite 1: Jämä-Moon ja Jämä Star lämpöpumppujen tuotetiedot	77
	Liite 2: Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen SPF-luvut (tilat), 20 000 kwh	78
	Liite 3: Jämä Star maalämpöpumppujen SPF-luvut (tilat).....	79
	Liite 4: Jämä-Moon 6 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 20 000 kWh.....	80
	Liite 5: Jämä-Moon 8 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 20 000 kWh.....	81

Liite 6: Jämä-Moon 14 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 20 000 kWh.....	82
Liite 7: Jämä Star 6 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 20 000 kWh.....	83
Liite 8: Jämä Star 8 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 20 000 kWh.....	84
Liite 9: Jämä Star 12 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 30 000 kWh.....	85
Liite 10: Jämä Star 15 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 40 000 kWh.....	86
Liite 11: Jämä Star 17 kW SPF-luku (tilat) menoveden funktiona, 40 000 kWh.....	87

LYHENTEET JA MERKINNÄT

$a(Lp)$	lämpöpumpun regressiosuoran vakiotekijä	
$a(rakennus)$	rakennuksen regressiosuoran vakiotekijä	
A_{netto}	rakennuksen lämmitettävä nettopinta-ala	m^2
$b(Lp)$	lämpöpumpun regressiosuoran regressiokerroin	
$b(rakennus)$	rakennuksen regressiosuoran regressiokerroin	
COP_{Carnot}	Carnot lämpökerroin	
$COP_{höyryprosessi}$	höyryprosessin lämpökerroin	
COP_L	lämpöpumpun korjattu lämpökerroin	
COP_M	standardimitattu lämpöpumpun lämpökerroin	
C_v	lämpökapasiteetti vakioilavuudessa	J/K
DH_{ar}	lämpötilavälin alarajan kumulatiivinen astetuntikertymä	$^{\circ}Ch$
DH_{tpiste}	tehomitoituspisteen kumulatiivinen astetuntikertymä	$^{\circ}Ch$
DH_{yr}	lämpötilavälin ylärajan kumulatiivinen astetuntikertymä	$^{\circ}Ch$
E	rakennuksen energiatehokkuusluku	kWh/m^2
$E_{kok.}$	lämmityksen sähköenergiankulutus	kWh
E_{kv}	sähköenergian kulutus käyttöveden lämmityksessä	[kWh]
$E_{lisälämmitys(tilat)}$	lisälämmitysenergian tarve tiloille	[kWh]
$E_{lisälämmitys(kv)}$	lisälämmitysenergian tarve käyttövedelle	[kWh]
E_{tilat}	sähköenergian kulutus tilojen lämmityksessä	[kWh]
$f_{energiamuoto}$	lämmitysenergiamuodon energiamuotokerroin	
f_T	häviökerroin	
h_1	entalpia lauhduttimen jälkeen	J/kg
h_2	entalpia ennen höyrystintä	J/kg
h_3	entalpia höyrystimen jälkeen	J/kg
h_4	entalpia kompressorin jälkeen	J/kg
h_{4s}	tulistuneen höyryn entalpia höyrystimen jälkeen	J/kg
k	lisälämmitysenergiakerroin	
LP_{ANTO}	lämpöpumpun antoteho	kW
$\overline{LP_{OTTO}}$	lämpöpumpun ottotehon keskiarvo	kW
\dot{m}	kylmäaineen massavirta	kg/s
N	moolimäärä	mol
N_{tpiste}	tehomitoituspisteen kumulatiivinen tuntikertymä	h
N_{iraja}	Lp:n toimintarajan kumulatiivinen tuntikertymä	h

N_{yr}	ylärajalämpötilan kumulatiivinen tuntikertymä	h
p	paine	Pa
P	prosessista saatu lämpöteho	kW
P_k	kompressorin teho	kW
Q_1	prosessista saatu energia	kWh
Q_2	prosessiin tuotu energia	kWh
Q_{kv}	rakennuksen käyttövesienergia	kWh
$Q_{lämmitys}$	rakennuksen lämmitysenergia	kWh
S	entropia	J/K
SPF	vuosihyötysuhde	
SPF_{tilat}	lämpöpumpun vuosihyötysuhde tilojen lämmityksen	
SPF_{kv}	lämpöpumpun vuosihyötysuhde käyttövedelle	
R_u	yleinen kaasuvakio	J/molK
T_1	lämpötila ennen kompressoria	K
T_2	lämpötila kompressorin jälkeen	K
T_3	lämpötila lauhduttimen jälkeen	K
T_4	lämpötila paisuntaventtiilin jälkeen	K
T_h	höyrystymispainetta vastaava kylläisen höyryn lämpötila	K
T_l	lauhtumispainetta vastaava kylläisen höyryn lämpötila	K
T_m	menoveden lämpötila	°C
T_s	sisälämpötila	°C
T_{tpiste}	tehomitoituspisteen lämpötila	°C
V	tilavuus	m^3
V_1	tilavuus ennen kompressoria	m^3
V_2	tilavuus kompressorin jälkeen	m^3
V_3	tilavuus ennen paisuntaventtiiliä	m^3
V_4	tilavuus paisuntaventtiilin jälkeen	m^3
W	prosessissa kulunut sähköteho	kW
x	tehomitoituspiste	
Δs	entropian muutos	J/kgK
η	lämmitysprosessin hyötysuhde	
$\eta_{häviö}$	häviökerroin	
η_k	kompressorin hyötysuhde	
ϕ_l	lauhduttimen teho (antoteho)	kW
ΣQ_{LP}	lämpöpumpun tuottama energia vuoden aikana	kWh

ΣE lämpöpumpun sähkönkulutus vuoden aikana kWh

1 JOHDANTO

Uusiutuvan energian hyödyntäminen rakennusten lämmityksessä on kasvussa. Syynä kehitykseen on ihmisten tietoisuus fossiilisten polttoaineiden vaikutuksesta elinympäristöön ja energian hinnan nousu. Euroopan unioni pyrkii toiminnallaan edistämään energiatehokasta rakentamista ja asumista. Säädöksillä luodaan energiatehokas toimintamalli Euroopan valtioissa ja vaikutetaan niiden kautta globaaliin energiasäästöä kehittäviin toimenpiteisiin. Rakentamismääräysten uudistuminen on osa muutosta. Ympäristöministeriö on laatinut rakentamismääräyskokoelman osiin *Rakennusten energiatehokkuus D3* [1] sekä *Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta D5* [2] uudet säädökset ja laskennan, jotka koskevat uudisrakentamista. Rakentamiseen kohdistuvalla energiauudistuksella pyritään kehittämään energiatehokasta rakentamista energiatavoitteiden saavuttamiseksi. Uusiutuvan energian hyödyntäminen ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen ovat osa kehitystä.

Rakennusten energiatehokkuus D3 -ohjeessa on määritetty uudisrakennuksen energiatehokkuusvaatimukset sekä energialaskennan säännöt. *Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta D5* -ohjeessa on annettu ohjeet teoreettisen rakennuksen energiatehokkuusluvun, eli E-luvun laskennalle. Laskennalla selvitetään rakennuksen teoreettinen ostoenergian määrä vuodessa. Lämmitysmuodolla on merkitystä ostoenergian ja E-luvun suuruuteen.

Lämpöpumput pystyvät hyödyntämään uusiutuvaa energiaa tehokkaasti lämpöpumpputyypistä riippuen maasta, ilmasta tai vedestä. Lämpöpumput ovat siten uudistuksessa merkittävässä asemassa. Lämpöpumppujen toimintaidea perustuu uusiutuvan energian hyödyntämiseen lauhtumis- ja höyrystymisprosessin välityksellä. Öljylämmityksessä tuotettua energiaa suhteutetaan kulutettuun öljymäärään ja öljyn energiasisältöön. Puulämmityksessä puolestaan tuotettu energia suhteutetaan kulutettuun puumäärään ja poltetun puun energiasisältöön. Hyötysuhde kertoo, kuinka paljon laite pystyy tuottamaan energiaa suhteessa polttoainemäärään eli kulutettuun energiaan. Lämpöpumpuissa tuotettu energia suhteutetaan kulutettuun sähköenergiaan. Kulutettu sähköenergia muodostuu laitesähköstä, eli kiertovesipumpun ja kompressorin kuluttamasta sähköenergiasta, sekä lisälämmitykseen kuluvasta sähköenergiasta. Lämpöpumpun vuotuista hyötysuhdetta indikoi SPF-luku, joka tulee sanoista Seasonal Performance Factor [3].

Lämpöpumpun hyötysuhde on merkittävässä asemassa E-luvun laskennassa. Lämmitysjärjestelmän energiankulutuksessa otetaan huomioon rakennuksen energiankulutus, jo-

hon sisältyy lämmitysjärjestelmähäviöt ja lämmöntuoton vaikutus. Häviöt ja lämmöntuoton vaikutus otetaan huomioon lämpöpumppujen osalta SPF-lukujen avulla [2]. Laskentaohjeessa *D5* on annettu valmiit laskennassa hyödynnettävät lämpöhäviöt varaajien osalta ja lämpöpumppujen SPF-luvut. Arvot perustuvat standardimittauksiin ja laskentaan. Taulukoitujen SPF-lukujen rinnalle ympäristöministeriö on teettänyt yksityiskohtaisen teoreettisen laskentamenetelmän lämpöpumppujen SPF-luvun laskentaan. Aaltoyliopisto on tehnyt laskentamenetelmään perustuvan laskentamallin, joka perustuu lämpöpumpun tuote- sekä mittaustietoihin [4]. Laskentamallin avulla selvitetään Jämä lämpöpumppujen SPF-luvut.

Tutkimus tehdään Raisiossa toimivalle Kaukora Oy:lle. Kaukora on vuonna 1976 perustettu LVIS-laitteita valmistava yritys. Yrityksen tuotevalikoimaan kuuluvat laitteet eri lämmitysmuodoille, kuten sähkö- ja lämpöpumppulämmitys, öljy- ja bioöljylämmitys, kaukolämmitys sekä hybridilämmitys. Työn tavoitteena on selvittää Kaukora Oy:n lämpöpumppujen SPF-luvut laskennan ja mittaustulosten avulla. SPF-luvut lasketaan rakentamismääräyksen laskentaohjeen *D5* yksityiskohtaisen laskentamallin mukaan hyödyntäen tuotetietoja. SPF-lukujen laskentaan on tämän työn yhteydessä tehty Excel-pohjainen laskentatyökalu. Laskenta on tehty Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumpuille sekä Jämä Star maalämpöpumpuille. Laskennassa tarkastellaan hyötysuhdelukuja kolmella eri lämmönjaon menoveden lämpötilalla, kolmessa eri säävyöhykkeessä. Laskennassa on eritelty lämpöpumppujen SPF-luku rakennuksen- ja käyttöveden lämmityksessä. SPF-luvun laskentatyökalu jää Kaukora Oy:n käyttöön. Työkalu on tarkoitettu aputyökaluksi Jämä-Moon sekä Jämä Star mallisten lämpöpumppujen SPF-lukujen arviointiin eri asiakastapauksissa ja käyttökohteissa.

Laskettuja SPF-lukuja verrataan rakentamismääräyskokoelman rakennuksen energiatehokkuusmääräyksen *D3* mukaisiin taulukoituihin arvoihin ja joidenkin pumppujen osalta mitattuihin energiankulutuslukemiin perustuviin arvoihin. Lisäksi arvoja verrataan Nibe VPDIM 2.5 lämpöpumppujen mitoitusohjelman antamiin hyötysuhdelukemiin. Tulosten tarkastelussa analysoidaan eri kriteerein määritettyjen SPF-lukujen vaihtelevuutta eri säävyöhykkeillä ja kussakin säävyöhykkeessä kolmessa eri menoveden lämpötilassa. Tuloksista nähdään eri tavoin määritettyjen SPF-lukujen keskinäinen vaihtelu. Työssä hyödynnettävien mittaustulosten tiedot ovat Kaukora Oy:n referenssikohteita. Kohteissa on kerätty lämpöpumpun anto-, otto- ja lisäenergiankulutustietoja useammalta vuodelta referenssikohteesta riippuen. Työn yhteydessä selvitetään myös eri keinoin saatujen SPF-lukujen vaikutus E-lukuun.

Markkinoilla olevien lämpöpumppumallien lämpökertoimissa on suuria eroavaisuuksia. Lämpökerroinlukemat on joissain tapauksissa ilmoitettu puutteellisilla tiedoilla ja siten johdettu kuluttaja harhaan. Kaukora Oy halusi selvittää Jämä-mallisten lämpöpumppujen vuosihyötysuhdelukemat eri olosuhteissa. Tuloksista pystytään huomaamaan eri kriteerein määritettyjen lukujen keskinäiset suhteet.

2 RAKENNUKSEN ENERGIALASKENTA

Ympäristöministeriö on laatinut Rakentamismääräyskokoelman osiin *Rakennusten energiatehokkuus D3* sekä *Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta D5* uudet säädökset ja laskennan, jotka koskevat uudisrakentamista. *Rakennusten energiatehokkuus D3* ohjeessa on määritetty uudisrakennuksen energiatehokkuusvaatimukset ja energialaskennan säännöt. *Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta D5*-ohjeessa on annettu ohjeet teoreettiselle rakennuksen energiatehokkuusluvun, eli E-luvun laskennalle. Tässä kappaleessa selvitetään mihin säädökset perustuvat ja mihin E-luku ja sen käyttö perustuu.

2.1 Energialaskennan tarve ja lähtökohta

Energiaudistuksen taustalla on Suomen strategiset tavoitteet ja sitoumukset rakennus- alalla, jotka pohjautuvat kansainvälisiin, Euroopan unionin ja Suomen sopimuksiin sekä säädöksiin. Sopimusten tavoitteena on ehkäistä ilmaston lämpenemistä, pienentää kasvihuonepäästöjä, nostaa uusiutuvien energialähteiden käyttöä sekä vähentää energiankulutusta. Kansainvälisellä Kioton sopimuksella pyritään pienentämään maiden hiilidioksidipäästöjä 20 % vuodesta 1990 vuoteen 2020 mennessä. Tavoitteiden toteuttamisesta kukin sopimuksen allekirjoittanut päättää kuitenkin itsenäisesti. [5, s. 18]

Suomen ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitteita ohjaa Euroopan unionissa sovitut tavoitteet ja toimenpiteet. Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikan tavoitesuunnitelmaan sisältyy kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 %, uusiutuvien energialähteiden osuuden nostaminen 20 % energian loppukulutuksesta sekä energiatehokkuuden parantaminen 20 % vuoteen 2020 mennessä. Euroopan unionin energiapalveludirektiivin avulla pyritään Euroopassa toteuttamaan kansainvälisiä energiatavoitteita. Energiapalveludirektiivi sisältää hankintojen energiatehokkuusohjeet, energiatehokkuuden huomioon ottavan suunnittelun ohjauksen, energiakatselmuksset, kulutusseurannan ja energiatehokkuutta kuvaavat tunnusluvut sekä uusiutuvien energialähteiden käyttöönoton. [6]

Euroopan jäsenmaiden energiatehokkuusuudistus pohjautuu EPBD (Energy performance of buildings directive) direktiiviin, joka muodostuu eurooppalaisista standardeista. Direktiiviin pohjautuvat energiatehokkuutta edistävät toimet, joita ovat energiatodistuksen käyttöönotto, energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset, lämmityskattiloiden ja ilmastolaitteiden määräaikaistarkastelut sekä rakentamismääräyksien uusinta. [7] Euroopassa rakennusten energiankulutuslaskentaan liittyvät standardit ja dokumentit laadi-

taan CEN:n teknisessä komiteassa. Suomen energialaskentauudistus pohjautuu teknisten komiteoiden ja komiteoissa työskentelevien työryhmien luomiin standardeihin. Taulukossa 2.1 on yhteenveto teknisistä komiteoista.

Taulukko 2.1. Eurooppalaiset rakennusten energiakulutuksen laskentastandardien laadintaan osallistuneet komiteat. [8 s. 14–16].

Tunnus	Nimi	Työaihe
CEN TC 89	Thermal performance of buildings and building components	Rakennusten ja rakennuskomponenttien lämpötekniiset ominaisuudet
CEN TC 228	Heating systems in buildings	Rakennusten lämmitysjärjestelmien toiminnallisten vaatimusten standardisointi.
CEN TC 156	Ventilation for buildings	Luonnollisen ja koneellisen ilmanvaihdon järjestelmien ja komponenttien testaus-, mitoitus- ja huollettavuusmenetelmien standardisointi
CEN TC 156	Light and lightning	Valo ja valaistus
CEN TC 89–156-228 JWG	Joint working group	Laskentamenetelmien luokittelu ja yksinkertaistukset, laskentamenetelmien opastus kriteereissä, reunaehdoissa ja ratkaisumenetelmissä

Suomen rakennusten energiankulutus on noin 40 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Energiankulutuksesta omakotitalojen osuus on 27 %. [6] Suomen ilmastostrategian tavoitteisiin sisältyy uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvattaminen 38 % energian loppukäytöstä, energiatehokkuuden ja energiasäästön lisääminen, uusiutuvan energian käytön merkittävä lisääminen sekä energiaomavaraisuuden kasvattaminen. [6;9] Suomessa rakennuksen energiatehokkuutta mitataan laskennallisen E-luvun avulla. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi mahdollistaa myös kulutukseen perustuvan energiatodistuksen käytön. Mittaukseen perustuva energiankulutus kertoo todellisen luvun ja käyttäjien toimenpiteillä ja käytöllä on suora vaikutus tulokseen. Ruotsissa on käytössä mittaukseen perustuva energiatodistus.

Energiatehokkuuslaskenta perustuu energiatehokkuusdirektiivin standardien laskentatapaan. Standardit on luokiteltu koskemaan laskennan tiettyjä osa-alueita kuten vaipan lämpöhäviöitä ja järjestelmien toimivuutta. Standardien tarkoitus on helpottaa rakennusten energiadirektiivin toteuttamista jäsenvaltioissa. Energiatehokkuuden ilmoitustavoille eli energiamittareille sekä energialuokituksille on annettu vaihtoehtoja, joista otetaan käyttöön laskentakohteelle soveltuva tapa. Energiatehokkuusdirektiivi muodostuu neljästä kokonaisuudesta ja kaikkiin kokonaisuuksiin on standardit. Pääosia ovat laskentatapa, energiatehokkuuden vähimmäisvaatimus, energiatehokkuustodistus sekä lämmityskattiloiden ja ilmastointijärjestelmien tarkastukset. [10]

Laskentatapaa käytetään hyödyksi energiatehokkuuden määrittämisessä. Lämmityksen ja jäähdytyksen nettoenergiastandardissa on esitetty useita laskentatapoja, joista voidaan valita laskennan tarkoitukseen soveltuva laskentatapa. Laskentatasoja ovat yksinkertaistettu kuukausi- tai vuodenaikalaskenta, yksinkertaistettu tuntilaskenta sekä yksityiskohdainen laskenta. Lämmitysjärjestelmien ominaisuuksia ja laskentaa tarkastellaan standardeissa EN 15316-1, EN 15316-2-1, EN 15316-2-3, EN 15316-4 (useita osia) sekä EN 15377 [8]. Käyttövetä käsitellään standardissa EN 15316-3 (useita osia) [8]. Suomessa uudessa rakentamismääräyksessä lämmitysjärjestelmän teho lasketaan kuukausitasolla rakennuksen teoreettisen kulutuksen mukaan.

2.2 E-luku energiatehokkuusmittarina

Suomessa työ- ja elinkeinoministeriö on toiminut energiasäästöä ja energiatehokkuutta koskevien toimenpiteiden parissa. Erinäiset toimikunnat ovat laatineet Suomelle strategian energiavoitteiden saavuttamiseksi ja arvioineet eri sektoreille tarvittavat energiasäästöä sekä energiatehokkuutta koskevat toimenpiteet. Tuloksena on tähän mennessä syntynyt toimenpide-ehdotuksia, joiden arvioiden mukaan päästään energiavoitteisiin vuoteen 2020 mennessä. Asuinrakennukseen liittyvät toimenpiteet koskevat uudisrakentamista sekä korjausrakentamisen energiatehokkuutta ja laitteiden energiatehokkuusvaatimuksia. [7] Energiatehokkuusmittarina toimii E-luku.

E-luku on energiamuotokertoimilla painotettu rakennuksen laskennallinen ostoenergiankulutus. Laskentaohjeessa on käytössä energiatasemenetelmä, jossa yhden kuukauden aikana rakennuksen sisään virtaava energiamäärä on sama kuin rakennuksesta ulos virtaava energiamäärä. Energian nettotarve lasketaan kuukausittain ja vuosikulutus on kuukausikulutusten summa. Laskennan lähtökohtana ovat EPBD:n mukaisesti rakennuksen ja taloteknisten järjestelmien ominaisuudet. Laskenta etenee kolmivaiheisesti. Laskennan lähtötietoja ovat rakennuskohtaiset lähtötiedot, rakennuksen käyttötiedot sekä ohjeissa annetut laskentamenetelmän ohjearvot. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan kuukausitason lämmitysenergian nettotarve. Toisessa vaiheessa määritetään jäähdytysenergian nettotarve, josta siirrytään järjestelmä laskentaan, johon sisältyy ilmanvaihto-, käyttövesi-, lämmitys, sähkö-, jäähdytys ja uusiutuvan omavaraisenergian laskenta. Kolmannessa vaiheessa rakennuksen kokonaisenergiankulutus (E-luku) lasketaan rakennuksen ostoenergiakulutuksesta energiamuotokertoimet huomioiden. Rakennuksen ostoenergian tarve lasketaan energiamuodoittain. [10;1]

E-luvun laskennan taserajoina käytetään rakennuksen ulkopintaa. E-luku lasketaan rakennuksen standardikäytölle, jolla tarkoitetaan rakennuksen vakioitua käyttöä. Tämä eroaa rakennuksen normaalista käytöstä, sillä mallissa ei ottaa huomioon käyttäjän käyttötottumuksia tai vaihtelevia toimintoja. Standardikäytön tarkoitus on mahdollistaa samojen käyttöä koskevien lähtöarvojen hyödyntäminen laskennassa. Lähtöarvoja ovat ilmamäärät, lämmitys- ja jäähdytysraja-arvot, kuluttajalaitteet, valaistus, ihmiset, käyt-

töaika, käyttöaste, ilmanvaihdon käyntiaika sekä säätiedot. Mallia perustellaan sillä, että määräyksillä voidaan ohjata rakennuksen ominaisuuksia ja käyttäjistä riippuvat toiminnot eivät vaikuta laskentaan. Todellisuudessa energiankulutus ei ole koskaan vakio, vaan se vaihtelee ajan suhteen. Rakennuksissa vaihtelua aiheuttavat vuodenaikojen ja säiden vaihtelu sekä käytön epäsäännöllisyys. Kokonaisenergian laskennassa säätietoina käytetään säävyöhykkeen 1 säätietoja rakennuksen maantieteellisestä sijainnista riippumatta. Lämmitystehontarpeen laskennassa ja lämmityslaitteiden valinnan yhteydessä käytetään säätietoja rakennuksen sijainnista riippuen säävyöhykkeiden 1-4 mukaan. [11;12]

Todellisuudessa kiinteistöjen käytöllä ja ylläpidolla on suuri merkitys energiatavoitteiden saavuttamisessa. Rakennusten järjestelmien ja laitteiden tarkoituksenmukaisella käytöllä sekä käyttäjien energiaa säästävillä käyttäytymistavoilla voidaan vaikuttaa 5-20 % kiinteistöjen energiankulutukseen. On arvioitu, että rakennusten tarkoituksenmukaisella käytöllä on mahdollista saavuttaa samansuuruinen säästö kuin uudisrakentamisella tai korjausrakentamisella on saavutettavissa. Laskennassa elinkaariajattelu jätetään myös huomiotta. Rakennusmateriaaleihin liittyvä energiankulutus on vahvasti sidoksissa rakennuksen energiatehokkuuteen. Käytön aikainen kulutus on n. 80 % rakennuksen elinkaariaikaisesta energiankulutuksesta, mutta rakennusten energiatehokkuuden parantuessa tilanne muuttuu vähitellen. [7;11]

Energiatehokkuutta olisi hyvä kuvata eri näkökulmista kattavan kokonaiskuvan saamiseksi. Energiatehokkuuden laskentaan liittyy valintoja sekä rajoituksia. Elinkaarilaskentaan liittyy valintoja, jotka vaikuttavat saatavaan tulokseen. Valintoja ovat mm. sitoutunut energiankulutus, käytönaikainen energiankulutus sekä kierrätetty energia. Laajuutta koskeva valinta liittyy mittausalueeseen eli taserajaan. Energiatehokkuuden kuvaus eri näkökulmista tarkoittaa useamman eri energiatehokkuusluvun käyttöä. Rakennuksissa tarkastelunäkökulmia voivat olla tilavuus, kokonaispinta-ala, lämmitetty pinta-ala, asukkaiden määrä ja vuokran arvo. Näkökulmia voidaan tarkastella useamman energiatehokkuusmittarin avulla. Mittari olisi tarkastelunäkökulmasta riippuva. Tarkastelunäkökulmia voivat olla kustannustehokkuus, materiaaltehokkuus, laatutekijät, ympäristötekijät ja energiatehokkuus. Energiatehokkuusmittareita voivat olla energiatehokkuusluku, ominaisenergiankulutus, hyötysuhde tai käyttövaiheen energiankulutus. [11]

Energiatehokkuusmittarien määrittäminen on jatkuva prosessi ja yksittäinen mittari ei anna kokonaiskuvaa energiatehokkuudesta. Mittarit tavoittelevat eri osa-alueiden tasapainoista huomioonottamista. Osa-alueita ovat rakennuksen todellinen energiankulutus, eri sidosryhmien merkitykselliset energiatehokkuusosa-alueet, mittareiden soveltuvuus käytäntöön sekä mittarin valinta lähtötietojen perusteella. Mittarien yhteiskäyttö antaa laajan kuvan rakennuksen energiatehokkuudessa. [11] Uusissa rakentamismääräyksissä näkökulmaksi on valittu energiatehokkuus ja energiatehokkuusmittariksi on luokiteltu

energiatehokkuusluku eli E-luku, jonka yksikkö on kWh/m². Ympäristötekijät on otettu huomioon polttoaineiden osalta teoreettisella energiamuotokertoimella. *Rakennusmääräyskokoelman laskentaohjeessa D5* E-luku on rakennuksen teoreettinen kokonaisenergiankulutus. Tarkemmin määriteltynä E-luku on laskennallinen luku, joka on standardikäytöllä lämmitetyn rakennuksen painotetun ostoenergian suhde lämmitettyä netto alaa kohden (kWh/m²). E-lukuun summataan kaikki rakennuksessa käytettävät lämmitysmuodon ostoenergiat energiamuotokertoimella painotettuna. Uudisrakennuksille on rakennustyyppistä riippuen määritetty suurin sallittu E-luku. Pientaloille määritetyt E-luvut, joita ei voida ylittää, on esitetty taulukossa 2.2. Määritykset ovat *Rakennusten energiatehokkuus määräyksessä D3*. Tampereen teknillisen yliopiston konstruktiotekniikan laitos on ympäristöministeriön ja alan teollisuuden rahoittamana tutkinut, minkälaisilla lämmitysratkaisuilla vuonna 2012 energiatehokkuusvaatimukset voidaan toteuttaa. Taulukossa 2.3 on esitetty yhden mallitalon tulos.

Taulukko 2.2. Uuden pientalon E-luku rajat. [2]

Lämmitettävä nettoala	E-luku [kWh/m ²]
$A < 120 \text{ m}^2$	204
$120 \text{ m}^2 \leq A \leq 150 \text{ m}^2$	$372 - 1,4 \cdot A$
$150 \text{ m}^2 \leq A \leq 600 \text{ m}^2$	$173 - 0,07 \cdot A$
$A < 600 \text{ m}^2$	130

Taulukko 2.3. Energiatehokkuusvaatimukset täyttävät pientalot [13].

Ominaisuus	Maalämpöpumppu RakMk 2012 määräykset täyttävä	Kaukolämpö RakMk 2012 määräykset täyttävä	Sähkö + aurinkokeräin ja varaava tulisija RakMk 2012 määräykset vertailuarvot	Sähkö + aurinkokeräin ja varaava tulisija RakMk 2012 määräykset täyttävä	Öljylämmitys+ aurinkokeräin ja varaava tulisija RakMk 2012 vertailuarvot	Öljylämmitys+ aurinkokeräin ja varaava tulisija RakMk 2012 määräykset täyttävä
Lämmönläpäisykerroimet [W/(m ² K)]						
alapohja						
maanvarainen	0,16	0,16	0,16	0,12	0,16	0,16
yläpohja	0,09	0,09	0,09	0,07	0,09	0,07
ulkoseinät	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17	0,17
ikkunat	1	1	1	0,75	1	0,75
ulko-ovet	1	1	1	0,7	1	0,7
Ilmanvuotoluku						
n50-luku [1/h]	2,3	2,3	2,3	1,1	2,3	1,1
q50-luku [m ³ /hm ²]	2	2	2	1	2	1
IV-ominaissähköteho [kW/(m ³ s)]	2	2	2	2	2	2
LTO-vuosihyötysuhde laitteelle [%]	45	45	45	75	45	75
Lämmityksen osastoenergia Energiamuotojen osuudet	sähkö 100 % (sis. Maalämpöpumpun käyttämän sähkön ja sähkölämmityksen)	kaukolämpö 100 %	sähkö 81,9 %, puu 19,1 %	sähkö 76 %, puu 24 %	öljy 87,6 %, puu 12,4 %	öljy 84,3 %, puu 15,7 %
Sähköinen IV-lämmityspatteri	ei	ei	kyllä	kyllä	ei	ei
E-luku [kWh/m ²]	145,7	162	219,8	173,4	206,8	173,4

Mallitalo on 142 m² yksikerroksinen puutalo, jossa lämmönjako tapahtuu vesipattereilla lämpötilassa 40/35 °C. Energiämääräyksen E-lukuvaatimus testikohteessa on 173 kWh/m². E-luvun laskennassa on käytetty Tampereen teknillisen yliopiston kehittämää laskentamallia. Rakennuksen lämmitysenergian nettotarpeen laskenta perustuu EN ISO 13790 JA EN 13370 standardeihin. Lämmöntuottojärjestelmien laskenta perustuu rakentamismääräyksen osiin D3 ja D5. [13] Testituloksesta nähdään, että energiatehokkuusvaatimukset täyttävät maalämpö ja kaukolämpö.

2.3 Energiamuotokerroin

Laskennassa käytettävien energiamuotokertoimien määrittämiskriteerinä on ollut primäärienergian käyttö ja painoarvo on uusiutumattomien luonnonvarojen käytössä. Energiatehokkuuslaskennassa painotus tapahtuu energiamuotokertoimen avulla ja laskettu ostoenergian määrä (kWh) kerrotaan käytössä olevan energialähteen kertoimella. Energian käytössä tulee rakennuksen energiankulutuksen lisäksi ottaa huomioon kulutuksen seuraus, josta energiamuotokertoimessa onkin kyse. Energiamuotokerroin on energiankulutuksen ja kulutuksesta aiheutuneiden seurausten verrannollisuuskerroin. [14;15]. Energiamuodon kertoimet on esitetty taulukossa 2.4.

Taulukko 2.4. Energiamuodon kertoimet. [1]

Energiamuoto	Energian muodon kertoimet
Fossiiliset polttoaineet	1
Sähkö	1,7
Kaukolämpö	0,7
Kaukojäähdytys	0,4
Uusiutuvat polttoaineet	0,5

Energian arvoa voidaan tarkastella useilla eri perusteilla. Kaikilla rakennuksiin virtaavilla energiavirroilla on taustalla erisuuruinen energiaketju ja energian tuottamiseen käytetty primäärienergia voi olla moninkertainen hyötyenergiaan verrattaessa. Energiavirrat aiheuttavat myös päästöjä ja aiheuttavat luonnonvarojen kulumista, mitkä vaikuttavat ympäristöarvoihin. [11] Energiamuotokertoimella määritetään kunkin energialähteen ympäristöseuraus. Vaikka kahdella rakennuksella on sama energiankulutus, mutta käytössä eri energiamuodot, on E-luku erisuuruinen energialähteen erilaisuudesta johtuen. Eri energialähteet saadaan keskenään vertailukelpoisiksi, ja tästä syystä kertoimella on merkitystä E-luvun määrittämisessä.

Energiamuotokertoimeen vaikuttavat energiamuodon primäärienergiankäyttö ja päästöt. Primäärienergialla tarkoitetaan energiaa ennen energian jalostusta käyttöön kuten öljy, kivihiili, auringonsäteily tuuli ja ydinenergia. Primäärienergiankulutus esittää saatavissa olevaa energiaa, luonnonvarojen määrää sekä niiden käyttöä ja kulumista. Energiamuotojen jalostuksessa sekä käytössä syntyy hiilidioksidipäästöjä. Päästöt syntyvät polttoaineen palamisen yhteydessä, ja ovat ominaiset kullekin polttoaineelle. Polttoaineiden lisäksi päästöjä tuottavat primäärienergian jalostustuotanto, joka tulee ottaa huomioon energiamuotokertoimen määrittelyssä. Tuotanto jakaantuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon sekä erillistuotantoon. Yhteistuotannossa polttoaineiden sekä tuotannon aiheuttamien päästöjen jakaminen sähkön ja lämmön kesken aiheuttaa ongelmia primääri- sekä päästökertoimien määrittämisessä. Vakiintunutta jakotapaa ei ole ja tilastokeskus on käyttänyt energia- ja hyödynjakomenetelmää. Rakentamismääräyksissä olevissa kertoimissa on hyödynnetty hyödynjakomenetelmää energiamenetelmän sijasta. Energia-

muotojen termodynaamisen arvon erilaisuudesta johtuen energiamuodot saatetaan vertailukelpoisiksi keskenään energiakertoimien avulla. [11, s. 22] Lämmitystavan kokonaisenergiatarkastelu muodostuu lämmitystarpeesta, lämmitystavasta ja energiamuotokertoimesta. [6]

2.4 Lämpöpumpun energialaskenta

Rakentamismääräysten laskentaohjeen mukaan lämmitysjärjestelmän energiankulutus lasketaan tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmitysenergian nettotarpeista. Laskenta tehdään kuukausikohtaisesti säävyöhykkeen 1 tiedoilla. Laskennassa otetaan huomioon lämmönluovutuksen, lämmönjaon sekä lämmön varastoinnin häviöt ja lämmöntuoton vaikutus. Lämmitysenergian tuoton vaikutus lämmitysjärjestelmän energian kulutukseen lasketaan hyötysuhteen ja lämpökertoimen avulla. Laskenta tehdään vuositasolla. [8, s. 40] Lämmön varastoinnin osalta laskennassa hyödynnetään laskentaoppaan taulukoituja arvoja.

Lämmöntuottojärjestelmällä on vaikutusta rakennukselle laskettavaan E-lukuun. E-luku indikoi teoreettista ja laskennallista rakennuksen kuluttamaa ostoenergiaa. Ostoenergian määrä riippuu lämmöntuottojärjestelmästä. Lämmöntuottojärjestelmän energiankulutus muodostuu lämmitys- ja sähköenergian kulutuksesta, jotka lasketaan erikseen. Mikäli lämmöntuotto järjestelmä on esimerkiksi sähkökattila, koko rakennuksen kuluttama lämmitysenergia muodostuu vain yhdestä energiamuodosta. Rakennuksen laskennallinen lämmitysenergiankulutus kerrotaan sähkön energiamuotokertoimella, joka on 1,7. E-luku lasketaan kaavalla (2.1).

$$E = \frac{\sum(f_{\text{energiamuoto}} Q_{\text{ostoenergia}})}{A_{\text{netto}}} \quad (2.1)$$

jossa

E	on rakennuksen energialuku
$f_{\text{energiamuoto}}$	on lämmitysenergiamuodon energiamuotokerroin
A_{netto}	on rakennuksen lämmitettävä nettopinta-ala
$Q_{\text{ostoenergia}}$	on rakennuksen ostoenergian määrä

Mikäli rakennuksen lämmityssähkön kulutus on 15 000 kWh ja lämmitettävä pinta-ala 90 m². Rakennuksen energiatehokkuusluku eli E-luku on tällöin 283 kWh/m². Lämpöpumppulämmityksessä ostoenergiaksi luokitellaan lämpöpumpun toimilaitteiden kuten keruupuolen kiertovesipumpun tai puhaltimen ja kompressorin sähkönkulutus sekä lisälämmitysenergia. Mitä parempi hyötysuhde lämpöpumpulla on, sitä pienempi on myös ostoenergiankulutus. Oletetaan edellisen esimerkin talossa olevan lämmitysmuotona maalämpö ja sähkö. Lämpöpumppu kuluttaa vuodessa 7000 kWh sähköenergiaa. Sähköenergiankulutus sisältää lisälämmitysenergian sekä laitesähkön. Rakennuksen ener-

giatehokkuusluku on tällöin 132 kWh/m². E-luvun laskennassa ei ole erillistä kerrointa uusiutuvalle omavaraisenergialle. Laskennassa otetaan huomioon vain uusiutuva ostoenergia esimerkiksi puu tai pelletti. Uusiutuvan ostoenergian energiamuotokerroin on 0,5.

Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskentaosassa D5 esitetään yksinkertainen laskentamalli lämpöpumpun sähkönkulutukseen, lämmitysenergian tuottoon ja lisälämmitysenergian tarpeen laskentaan. Lämpöpumpun sähkönkulutus ratkaistaan lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian sekä kausisuorituskykykertoimen eli SPF-luvun avulla. Laskennassa käytettävät SPF-luvut ovat D5 ohjeessa esitetyt taulukkoarvoja ja laskenta tehdään koko vuoden lämmitysenergian tarpeesta.

3 LÄMPÖPUMPPU LÄMMÖNLÄHTEENÄ

Lämpöpumpppuolosessissa voidaan hyödyntää ilmaista uusiutuvaa energiaa lämmitykseen tai jäähdytykseen. Molemmissa tehtävissä lämpöpumppu hyödyntää lämpöpumpun tyypistä riippuen uusiutuvaa energiaa. Tässä työssä lämpöpumppua tarkastellaan vain lämmityskäytössä. Lämpöpumppulämmityksen suosio perustuu uusiutuvan energian käyttöön ja näin ollen pieneen ostoenergian kulutukseen. Ostoenergiaa ovat järjestelmässä kuluttavien kiertovesipumppujen sekä kompressorin sähkön- ja lisäenergiankulutus. Lisäenergiaa voi lämpöpumppujärjestelmästä ja tyypistä riippuen olla sähkö, öljy, puu tai kaukolämpö. Lisäenergian osuuden suuruus riippuu siitä kuinka suuren osuuden lämpöpumpun on suunniteltu kattavan rakennuksen huipputehontarpeesta. Tehonpeitto prosentti kuvaa, kuinka suuren osuuden lämpöpumppu tuottaa rakennuksen huipputehontarpeesta.

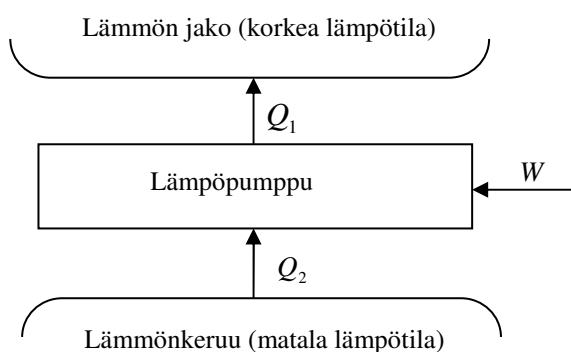
Lämpöpumpppuolosessi mahdollistaa matalan lämpötilan energian prosessoinnin korkeampaan lämpötilaan ja energian hyödyntämisen lämmitykseen. Matalan lämpötilan lämmönlähteitä ovat esimerkiksi ilma, maa ja vesi. Hyödynnettävä energiamäärä riippuu täysin lämmönlähteen ja lämmönjaon menoveden lämpötilasta. Optimaalinen lämmönlähde on lämpötilaltaan mahdollisimman korkea ja vakaa koko lämmityskauden. Lämpöpumpun toiminnalle merkittäviä seikkoja ovat lämmönlähteen lämpötila, lämmönlähteen etäisyys lämpöpumpusta, lämmönjakopiirin lämpötilataso sekä käyttäjän kannalta vuotuiset säästöt ostoenergiassa.

Maalämpöpumput pystyvät tuottamaan koko rakennuksen huipputehontarpeen. Tällöin puhutaan täystehomitoituksesta, eli lämpöpumpulla tuotetaan 100 % rakennuksen huipputehontarpeesta. Usein maalämpöpumput mitoitetaan kuitenkin osatehomitoituksella, jolloin huippupakkasilla lämpöpumpulla tuotetaan 70–85 % rakennuksen huipputehontarpeesta. Osatehomitoituksessa sähköllä tuotetaan vain huippupakkasilla tarvittava lisälämpö. Maalämpöpumppu voidaan mitoittaa myös huomattavasti pienemmällä energianpeittoasteella, jolloin esimerkiksi öljy- tai puukattila toimii maalämpöpumpun rinnalla. Ilma-vesilämpöpumput eivät pysty kattamaan maalämpöpumppuihin verrattuna yhtä suurta osaa rakennuksen huipputehontarpeesta. Ilma-vesilämpöpumppu ottaa energiaa ulkoilmasta ja lopettaa lämmityksen ulkoilman ollessa -20 °C. Usein lämpöpumpuissa on sulatuskäynti, joka pitää lämpöpumpun sulana. Sulatuksen aikana lämpöpumppu ei tuota, mutta kuluttaa kiertovesipumpun ottaman sähkötehon. Lisäksi ilma-vesilämpöpumpun keruuilma on viileämpi pidemmän ajan vuodesta, kuin vastaavasti maalämpöpumpun keruupiiri.

Lämpöpumpun todellista hyötyä lämmöntuottojärjestelmänä kuvaa hyötysuhde eli lämmöntuoton suhde kulutukseen. Lämpöpumpun lämpökerroin eli COP-luku kuvaa lämpöpumpun tuoton suhdetta kulutukseen tietyissä olosuhteissa. Olosuhteina tarkoitetaan lämmönlähteen ja käytön lämpötilatasoja. COP-luku 3 tarkoittaa, että lämpöpumppu antaa 3 kW:a ja kuluttaa 1 kW:n. Lämpökertoimeen vaikuttaa merkittävästi lämpöpumpun tuottama lämpötila. Vuositasolla hyötysuhdetta tarkastellaan SPF-luvun avulla, joka on keskimääräinen vuotuinen lämpökerroin. Luvussa otetaan huomioon lämpöpumpun lisäksi vuoden sääolosuhteet, sijainti, lämmönkeruutapa, lämmönjakotapa ja lisälämmitysenergia.

3.1 Carnot-prosessi

Lämpöpumpun tehtävä on ottaa lämpöenergiaa matalamman lämpötilatason lähteestä ja luovuttaa lämpö korkeamman lämpötilatason käyttökohteeseen. Jotta prosessi on mahdollinen, tulee prosessiin tuoda energiaa. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön eli energian säilymislain mukaan, sisäenergian muutos on työn ja siirtyvän lämpömäärän summa. Sama periaate pätee myös lämpöpumppuprosessissa (kuva 3.1). Prosessissa tuotettu lämpö on lämmönlähteestä saadun lämmön sekä prosessissa tehdyn työn summa, (kaava 3.1). [16, s. 3:1] Lämpöpumppuprosessissa komponentteina toimivat kaksi vastavirta levylämmönsiirrintä eli höyrystin ja lauhdutin, kompressorin sekä paisunta-venttiili.



Kuva 3.1. Lämpöpumpun periaatekaavio. [16, s.13:1]

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (3.1)$$

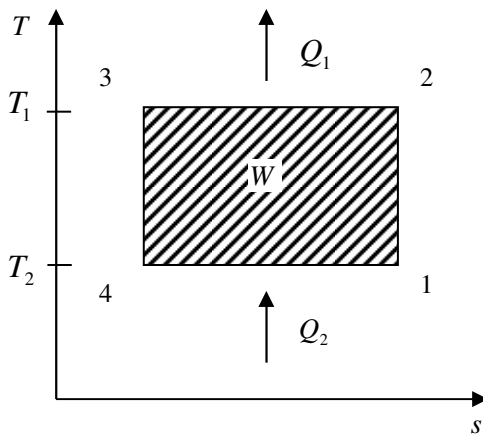
jossa

Q_1 on prosessista saatu lämpö

Q_2 on prosessiin tuotu lämpö

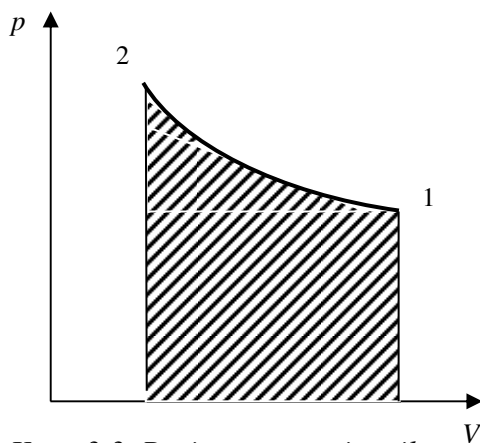
W on prosessissa tehty työ

Lämpöpumpun toimintaa voidaan verrata Carnot-prosessiin eli ideaalikiertoprosessiin. Carnot-prosessi jaetaan neljään osaprosessiin joita ovat isentrooppinen puristus 1-2, isoterminen lämmön luovutus 2-3, isentrooppinen paisunta 3-4 ja isoterminen lämmön tuonti 4-1. Carnot-prosessi voidaan esittää lämpötilan ja entropian avulla Ts -piirroksena (kuva 3.2).



Kuva 3.2. Carnot-prosessi T,s -kuvaajassa.

Osaprosesseille voidaan määrittää laskennallisesti tehty työ ja tuotettu lämpö prosessin luonteesta riippuen. Tehty työ saadaan prosessista riippuen integroitua kaavasta (3.2). Kaavaa esittää kuvassa 3.3 pV -piirroksessa käyrän $p=p(V)$ rajaama pinta-ala. [17, s.7] Tilavuuden muutustyö on negatiivinen paisunnassa ja positiivinen puristuksessa. Carnot prosessin puristuksessa ja paisunnassa muutos oletetaan tapahtuvan häviöttömästi ja lämpöeristetyksi eli isentrooppisesti. Välillä 1-2 $pv^n = \text{vakio}$, jossa $n = \gamma$, p on paine, v on ominaistilavuus ja γ on isentrooppivakio. Isentrooppisessa prosessissa tehty työ saadaan johdettua kaavassa (3.3) esitettyyn muotoon. Lämmön tuonti ja vienti tapahtuu vakiolämpötilassa eli isotermisesti. Isotermisessä prosessissa tehty työ saadaan johdettua kaavaksi (3.4). Kaavoja johdettaessa kiertoaine on oletettu ideaalikaasuksi jolloin, $pv = nR_u T$, jossa n on ainemäärä ja R_u yleinen kaasuvakio.



Kuva 3.3. Puristustyön paine tilavuuden funktiona p,V -tasossa

$$W = -\int p dV, \quad (3.2)$$

jossa

W on muutokseen tarvittava työ

p on paine

V on tilavuus

$$W = C_v (T_{2,4} - T_{1,3}) \quad (3.3)$$

jossa

C_v on lämpökapasiteetti vakiotilavuudessa

T on lämpötila

$$W = NR_u T_{2,1} \ln \left(\frac{V_{2,4}}{V_{3,1}} \right) \quad (3.4)$$

jossa

N on ainemäärä

R_u on yleinen kaasuvakio

V on tilavuus ennen kompressoria

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan systeemi pyrkii tasapainotilaan kaikissa olosuhteissa ja systeemi saavuttaa tasapainotilan ilman ympäristön muutoksia [17, s. 31]. Entropia kuvaa prosessin luonnetta. Entropian avulla pystytään selvittämään prosessin suunta sekä tuotetun työn ja lämmön määrä. [17, s. 31]. Entropian arvo riippuu tilan paineesta, lämpötilasta ja aineen koostumuksesta. Kaikki prosessit voidaan jakaa reversiibeihin eli kaksisuuntaisiin (palautuviin) ja irreversiibeihin eli yksisuuntaisiin (palautumattomiin) prosesseihin. Luonnolliset prosessit kuten lämpöenergian siirtyminen kuumasta aineesta kylmään aineeseen on yksisuuntainen eli irreversiibeli prosessi. Asian voi todentaa sillä, että lämpöenergian luovuttanut aine ei lämpene uudestaan ilman ulkoista työtä. Ideaalinen Carnot-prosessi muodostuu neljästä palautuvasta eli reversiibelistä osaprosessista. Prosessiin tuotettua lämpöä tarkastellaan entropian avulla. Palautuvalle prosessille lämpömäärä on

$$Q = \int T dS \quad (3.5)$$

jossa

S entropia

Sekä puristus että paisunta tapahtuvat isentrooppisesti, jolloin tuotettu lämpö on nolla. Lämmön tuonnissa ja poistossa tuotetaan lämpöä ja prosessi on isoterminen. Isotermi-

sessä prosessissa lämpömäärä on kääntäen verrannollinen tehtyyn työhön ja prosessissa tuotettu lämpö saadaan johdettua kaavasta (3.4) muotoon

$$Q = NR_u T_{2,4} \ln \left(\frac{V_{3,1}}{V_{2,4}} \right) \quad (3.6)$$

Lämpöpumpun tehokkuutta kuvaa luku, kuinka paljon lämpöpumppu antaa suhteessa kulutukseen. Teoreettisesti korkein mahdollinen lämpöpumpun lämpökerroin on Carnot-lämpökerroin kaava (3.7). Carnot-kertoimessa otetaan huomioon osaprosesseissa tehty työ ja tuotettu lämpö.

$$COP_{Carnot} = \frac{P}{W} = \frac{T_L \Delta s}{(T_H - T_L) \Delta s} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (3.7)$$

jossa

COP_{Carnot}	on Carnot lämpökerroin
P	on prosessista saatu lämpöteho
W	on prosessissa kulunut sähköteho
T_L	on lauhtumispainetta vastaava kylmän höyryn lämpötila
T_H	on höyrystymispainetta vastaava kylläisen höyryn lämpötila
Δs	on entropian muutos

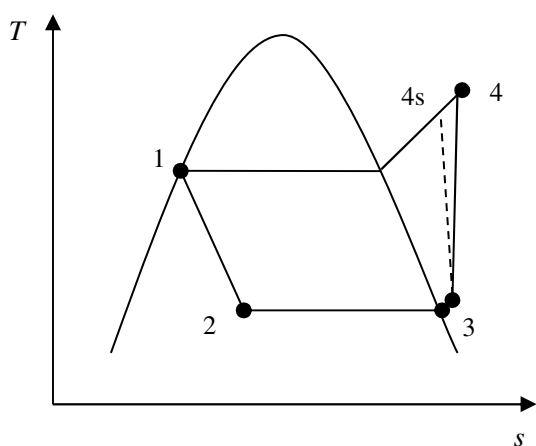
Todellisuudessa lämpöpumpun tehokkuus ei vastaa Carnot-prosessin hyötysuhdetta. Oikeassa höyryprosessissa syntyy häviöitä, jotka vaikuttavat teoreettiseen tulokseen. Kompressorissa tapahtuva kaasuuntuneen kylmäaineen puristus ei tapahdu häviöttömästi. Puristustyötä joudutaan tekemään teoreettista arvoa enemmän. Lisäksi kompressorissa tapahtuu lämmön luovutusta ympäristöön heikentäen hyötysuhdetta. Kompressorissa, putkistossa, höyrystimessä ja lauhttimessa on oikeassa tilanteessa painehäviöitä. [18, s. 67] Ideaalilämpökerroin riippuu prosessin ylimmästä ja alimmasta lämpötilasta T_H ja T_L . Korkean Carnot-lämpökertoimen saavuttamiseksi, on erityisen tärkeää saada prosessi toimimaan mahdollisimman pienellä lämpötilaerolla lauhttimen ja höyrystimen välillä.

3.2 Höyryprosessi

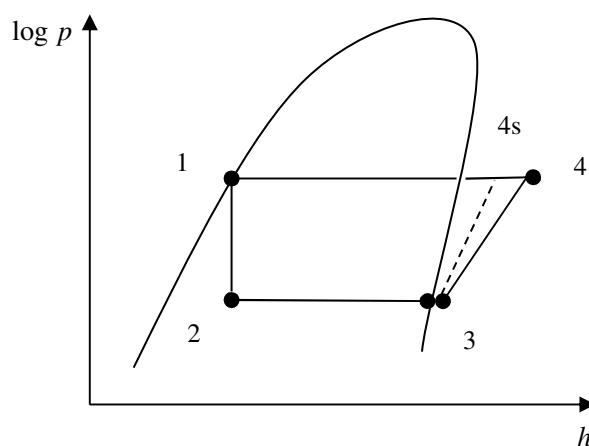
Kylmäaineen kiertoprosessi eli höyryprosessi perustuu kylmäaineen höyrystymisessä sitomaan lämpöön ja sen luovuttamiseen toiseen väliaineeseen. Höyryprosessin tehokkuus riippuu kylmäaineen käyttäytymisestä eri lämpötiloissa. Peruseriaate höyryprosessissa on, että kompressori ja paisuntaventtiili ylläpitävät tarkoituksenmukaista painetta p_1 ja p_2 kahdessa lämpötilatasossa T_1 ja T_2 . Matalammassa lämpötilatasossa ylläpidetään matalaa painetta ja nestemäinen kylmäaine höyrystetään. Korkeammassa lämpötilatasossa ylläpidetään korkeaa painetta, pakottaen höyrystynyt kylmäaine nesteytymään tai kondensoitumaan. Höyrystymisen aikana kylmäaineeseen siirtyy lämpöä ympäristöstä muuttaen nesteen höyryksi. Aineen olomuodon muutoksen yhteydessä

kylmäaineen lämpötila pysyy vakiona, mutta entalpia muuttuu. Entalpiamuutosta kutsutaan höyrystymisen latenttilämmöksi ja lämpötilaa kutsutaan puolestaan höyrystymislämpötilaksi. Korkeamman paineen prosessin aikana kylmäaine luovuttaa lämpöä lämmönjakonesteeseen ja muuttuu takaisin höyrystä nesteeksi. Lämpötilaa kutsutaan lauhdumislämpötilaksi. Kuvassa 3.4 on höyryprosessi esitetty T, s -piirroksena eli lämpötila entropian funktiona ja kuvassa 3.5 puolestaan p, h -piirroksena eli paine entalpien funktiona. [16, s. 3:3]

Höyryprosessissa kylmäaine virtaa ominaismassavirralla suljetussa systeemissä. Entalpiamuutosten sekä massavirran avulla pystytään määrittämään siirtyvä lämpöteho lauhduttimessa ja höyrystimessä sekä kompressorin tarvitsema teho. Prosessin hyötysuhde on lauhdutintehon ja kompressoritehon suhde.



Kuva 3.4. Höyryprosessi T, s -piirroksena.



Kuva 3.5. Höyryprosessi p, h -piirroksena.

- 1-2 Kylmäaineen (kosteaa höyryä) kuristus paisuntaventtiilissä.
- 2-3 Nestemäisen kylmäaineen höyrystyminen kylläiseksi höyryksi höyrystimessä
- 3-4 Höyrystyneen kylmäaineen puristus kompressorissa
- 4-1 Höyrystyneen kylmäaineen lauhduminen lauhduttimessa [18, s. 66]

Höyrystimen läpi virtaa jatkuva kylmäainevirta, joka höyrystyy lämmönsiirtymisen seurauksena lämmönkeruupiiristä (vaiheet 2-3). Höyrystymisen latenttilämpö otetaan lämmönkeruupiiristä eli ilmasta tai vesi-etanoli piiristä. Paineen muutos kylmäainevirtauksessa on hyvin pieni ja lämmön siirtyminen kylmäaineeseen voidaan sanoa tapahtuvan vakioaineessa ja vakio lämpötilassa. Höyrystimen painetta kutustaan höyrystymispaineeksi. Höyrystimen sisäänmenopisteessä (2), kylmäaine muodostuu kylläisestä nesteestä sekä kylläisestä vesihöyrystä. Lämmönsiirto aiheuttaa kylmäaineen faasimuutoksen kylläiseksi höyryksi. Lämmönsiirtoteho höyrystimessä saadaan ratkaistua entalpiaerotuksen avulla ennen ja jälkeen höyrystimen kaavalla (3.8). Käytännössä kylmä höyry absorboi lämpöä ja tulistuu ennen ulosmenoa höyrystimestä [16, s. 3:6]

$$\dot{\phi}_h = \dot{m}(h_3 - h_2) \quad (3.8)$$

jossa

- \dot{m} on kylmäaineen massavirta
- h_2 on entalpia ennen höyrystintä
- h_3 on entalpia höyrystimen jälkeen

Lämpöpumpussa kompressorityyppi on valmistajasta riippuva tekijä. Kompressorin voi olla mäntä-, kierukka- tai ruuvikompressorin. Jämsä lämpöpumpuissa käytetään kierukka-kompressorin, josta käytetään yleisesti nimitystä scroll-kompressorin. Kompressorin tarkoitus on siirtää höyrystynyt kylmäaine lauhduttimeen. Kompressorilla puristetaan kylmäainehöyry lauhduttimen korkeaan paineeseen, jotta kylmäaine tiivistyy nesteeksi vallitsevassa lämpötilatasossa. Kylmäaineelle tehtävä työ kompressorissa mahdollistaa kylmäaineen lämpötilan nousun ja lämmön luovutuksen väliaineeseen eli veteen lauhduttimessa. Kompressorin ja paisuntaventtiilin luovat yhdessä prosessin matalapaineisen ja korkeapaineisen osan. Ideaaliprosessin kompressorissa voidaan ajatella adiabaattiseksi eli lämpöhäviöttömäksi. Usein työ kompressorissa toteutetaan sähkömoottorilla.

[16, s. 3:7]

Höyrystynyt kylmäaine virtaa kompressorin pisteessä 3. Teoreettisesti kompressoriprosessin tapahtuu isentrooppisesti olettaen, että puristus on häviötön ja lämmön siirto ympäristöön on merkityksetön. Ideaaliprosessissa entropia on vakio. Puristuksen aikana kylmäaineen entalpia kasvaa pisteestä 3 pisteeseen 4s [16, s. 3:7] Oikeassa tilanteessa lisätyötä tarvitaan kompensoimaan mekaanista- ja nestekitkaa sekä muita häviöitä osaprosessissa. Kompressorin hyötysuhde on usein alueella 0,6-0,8. Piste 4 voidaan ratkaista, kun tunnetaan piste 4s (3.9b). Laskennassa oletetaan, että kompressorin toimii adiabaattisesti. [16, s. 3:8] Kompressorin teho saadaan ratkaistua kaavalla (3.9a).

$$P_k = \dot{m}(h_4 - h_3) \quad (3.9a)$$

jossa

P_k kompressorin teho

$$h_4 = \frac{(h_{4s} - h_3)}{\eta_k} + h_3 \quad (3.9b)$$

jossa

h_4 entalpia kompressorin jälkeen

h_{4s} tulistuneen höyryn entalpia häviöttömän puristuksen jälkeen

η_k kompressorin hyötysuhde

Lauhduttimessa kylmäaine tiivistyy nesteeksi. Höyrystyneen kylmäaineen virratessa lauhduttimeen höyryn paine on korkea ja väliaine aiheuttaa höyryn lauhtumisen. Lauhduttimessa väliaineena toimii lämmönjakopiirin hapeton vesi. Kylläisen höyryn lauhtuminen edellyttää, että lämmönjakopiirin vesi on viileämpää kuin lauhduttimeen virtaava kylmäainehöyry. [16, s. 3:9]

Tulistunut höyry virtaa lauhduttimeen pisteessä 4 ja poistuu lauhduttimesta pisteessä 1. Lauhtuminen kylläiseksi nesteeksi tapahtuu vakiolämpötilassa. [16, s. 3:9] Lämmönsiirtoteho lauhduttimessa saadaan ratkaistua entalpiaerotuksen avulla ennen ja jälkeen lauhdutinta kaavalla (3.10).

$$\phi_l = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (3.10)$$

jossa

ϕ_l lauhduttimen teho

h_1 entalpia lauhduttimen jälkeen

Lauhduttimesta tiivistynyt kylläinen neste virtaa paisuntaventtiilin läpi (pisteet 1-2) takaisin höyrystimelle. Paisuntaventtiilin avulla paine ja lämpötila saadaan alennettua lauhduttimen tasosta höyrystimelle sopivaan tasoon. Kuten aiemmin kerrottiin, paisuntaventtiili ja kompressorin jakavat kierron matalapaineiseen ja korkeapaineiseen osaan. Paisuntaventtiili lopettaa kierron ja kierto alkaa alusta. [16, s. 3:10]

Koko prosessin lämmityshyötysuhde saadaan ratkaistua lauhduttimen lämmönsiirtotehon sekä kompressorin ottaman tehon avulla kaavalla (3.11).

$$\eta = COP_{\text{höyryprosessi}} = \frac{\phi_l}{P_k} = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_3} \quad (3.11)$$

jossa

$COP_{\text{höyryprosessi}}$ höyryprosessin lämpökerroin

η höyryprosessin hyötysuhde

Höyryprosessin COP-luku riippuu höyrystymislämpötilasta T_2 , lauhtumislämpötilasta T_1 ja kylmäaineen ominaisuuksista.

3.3 Lämpöpumpppuolosessin lämpökerroin eli COP-luku

Edellä määritettiin lämpökertoimet Carnot-prosessille sekä höyryprosessille. Lukujen avulla (COP_{Carnot} ja $COP_{höyryprosessi}$) voidaan määrittää höyryprosessin poikkeama Carnot-prosessin kertoimesta kaavalla (3.12) [16, s. 3:19]. Lukemaa voidaan kutsua Carnot hyötysuhteeksi tai toisella nimellä termodynaamiseksi hyvyyskerroimeksi. Useimmilla kylmäaineilla häviökerroin on 80–85 %.

$$\eta_{häviö} = \frac{COP_{höyryprosessi}}{COP_{carnot}} \quad (3.12)$$

jossa

$\eta_{häviö}$ häviökerroin

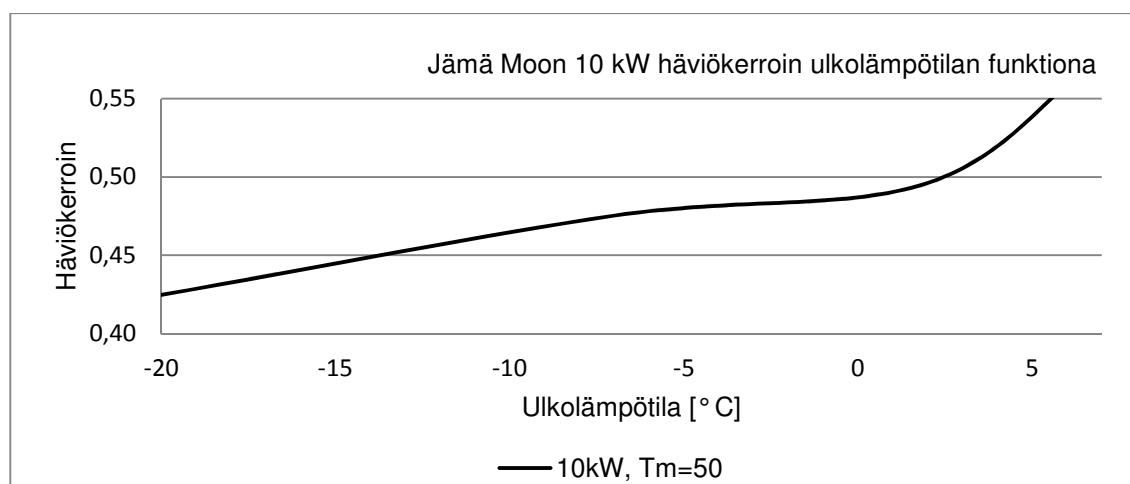
Tässä työssä laskennassa hyödynnetään höyryprosessin $COP_{höyryprosessi}$ -luvun sijasta standardin EN 14511 mukaan mitattujen COP-lukujen arvoja ja häviökerroin ratkaistaan kaavalla (3.13).

$$\eta_{häviö} = \frac{COP_M}{COP_{Carnot}} \quad (3.13)$$

jossa

COP_M standardimittauksen lämpökerroin

Häviökerroin ei ole normaalissa prosessissa vakio ja se on lauhtutinlämpötilan T_1 ja höyrystinlämpötilan T_2 funktio $\eta_{häviö\ kerroin}(T_2, T_1)$. [16, s. 3:20] Kuvassa 3.6 on esitetty kaavalla (3.13) määritetyt häviökertoimet R404A kylmäaineella lämpötilan T_1 ollessa 50 astetta.



Kuva 3.6. Carnot häviökerroin höyrystinlämpötilan T_2 funktiona lauhdutinlämpötilassa $T_1=50$ astetta. Lukemat perustuvat lämpöpumpun Jämä-Moon 10 kW tuotetietoihin.

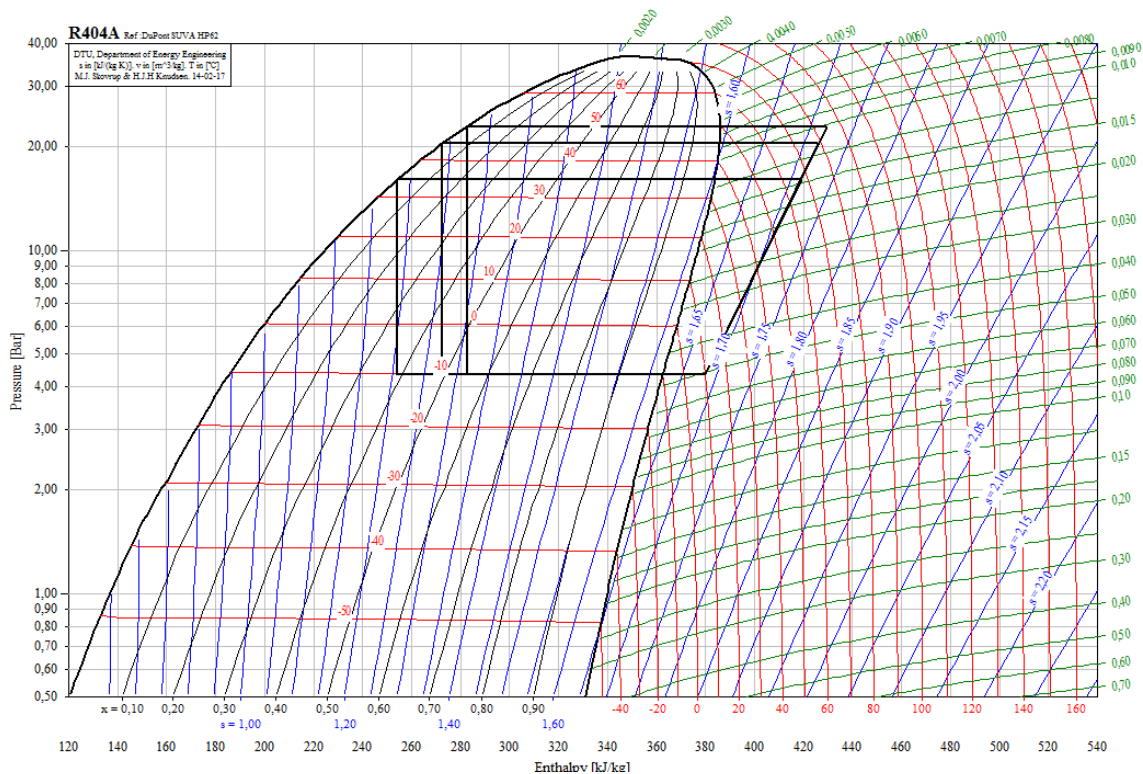
3.4 Kylmäaine R404A

Kylmäainepiirin avulla keruupiiristä kerätty energia prosessoidaan hyödynnettäväksi lämmönjakopiirissä. Kylmäainepiirissä kiertävä kylmäaine riippuu lämpöpumppuvalmistajasta. Kylmäaineen termodynaamiset ominaisuudet vaikuttavat kylmäaineen käyttäytymiseen kiertoprosessissa. Prosessissa lämmönsiirtymiseen ja painehäviöön vaikuttavia tekijöitä ovat aineen tiheys, viskositeetti, pintajännitys sekä lämmönjohtavuus. Muita vaikuttavia parametreja ovat moolimassa, höyrystymislämpö, ominaislämpö ja höyrinpaine. [18, s. 103]

Hyvien termodynaamisten ominaisuuksien lisäksi, kylmäaineen tulee olla käyttöturvallinen. Kylmäaineet eivät saa aiheuttaa vaurioita, tulipaloa tai muita vahinkoja vuototilanteessa. Lisäksi kylmäaineen kemialliset, fysikaaliset ja termodynaamiset ominaisuudet tulee soveltua systeemiin kustannustehokkaasti. Kemiallisilta ominaisuuksilta kylmäaineen tulee olla vakaa ja inertti. Terveysteen, turvallisuuden ja ympäristöön vaikuttavia ominaisuuksia ovat myrkyttömyys ja leimahtamattomuus. [16, s. 5:1] Tärkein ominaisuus kylmäaineessa on kemiallinen vakaus systeemissä. Kaikki muut kriteerit ovat merkityksettömiä, jos kylmäaine reagoi järjestelmässä olevien materiaalien kanssa. Toisaalta kemiallinen vakaus voi olla myös haittatekijä vuototilanteessa. Kylmäaineen ei tulisi olla niin vakaa, että se säilyy ympäristössä loputtomiin. Ideaalinen kylmäaine on vakaa systeemissä, mutta hajoaa helposti ollessaan kosketuksissa ilmakehän kanssa aiheuttamatta haitallisia aineita. [16, s. 5:2]

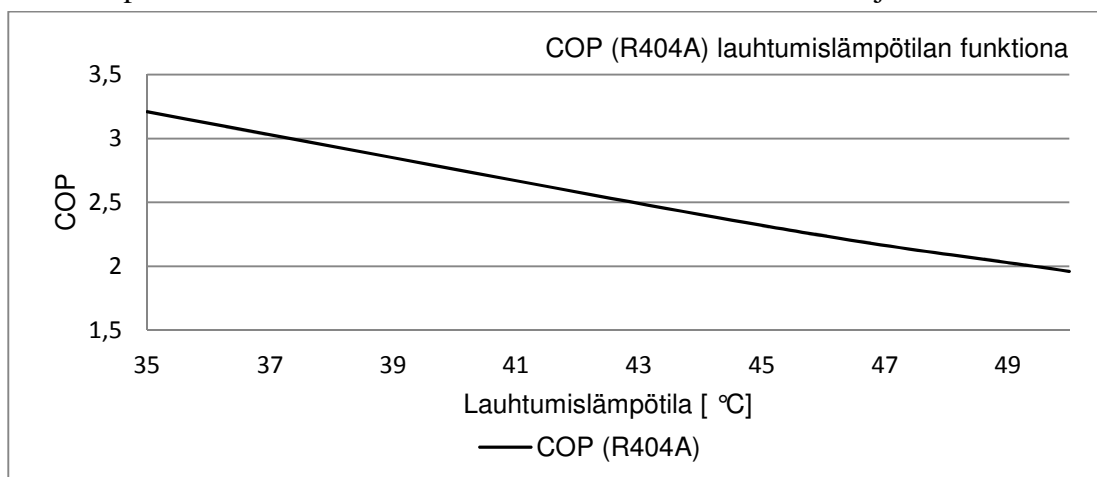
Kylmäaineella on merkitystä termodynaamisten ominaisuuksien vuoksi lämpöpumpun suorituskykyyn. Suurin tekijä lämpöpumpun suorituskykyyn ja hyvään lämpökertoimeen on höyrystimen ja lauhduttimen välinen lämpötilaero. Kuvassa 3.7 on esitetty kylmäaineen R404A p, h-kuvaaja höyrystymislämpötilalla -10 astetta ja kolmella eri lauhdutuslämpötilalla. Lauhdutuslämpötilat ovat 35 °C, 45 °C ja 50 °C. Höyrystimen ja

lauhduttimen painehäviöt voidaan olettaa pieniksi. Isentrooppinen hyötysuhde on laskettu arvolla 0,75 ja häviöiden aiheuttama tulistus on 20 K. Laskenta on tehty CoolPack kylmäainejärjestelmien simulointi-ohjelman avulla.



Kuva 3.7. Kylmäaineen R404A höyryprosessi p,h-piirroksena.

Kuvassa 3.8 on esitetty kylmäaineen R404A lasketut lämpökertoimet kolmella eri lauhtumislämpötilalla edellä kuvatun esimerkin mukaisesti CoolPack ohjelmalla.



Kuva 3.8. R404A kylmäaineen lämpökerroin höyrystyslämpötilassa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ lauhtumislämpötilan funktiona.

Kuvasta 3.8 nähdään lauhtumislämpötilan merkitys COP-lukuun. Lämpökerroin riippuu höyrystyslämpötilasta T_H ja lauhtumislämpötilasta T_L .

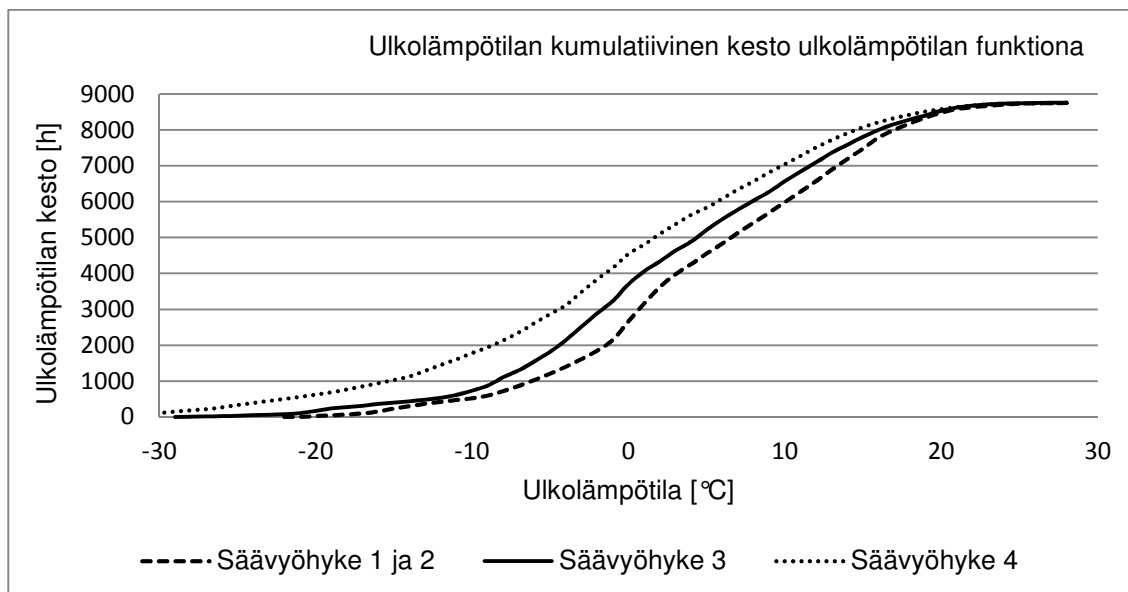
3.5 Lämmönkeruupiiri

Lämpöpumppuprosessissa on lämmönkeruupiiri (vesi ja etanoli), kylmäainepiiri (R404A, R407C) ja lämmönjakopiiri (hapeton vesi). Lämmönkeruupiirillä tarkoitetaan kiertojärjestelmää, josta saadaan otettua lämpöpumppu prosessin kautta energiaa hyötykäyttöön. Lämmönjakopiirillä tarkoitetaan puolestaan patteri- tai lattialämmityspiiriä, joiden tarkoitus on jakaa lämpöpumppuprosessin kautta saatua lämpöenergiaa tasaisesti koko rakennukseen. Tässä kappaleessa perehdytään lämmönkeruupiiriin. Lämmönkeruupiirit voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Ensimmäiseen ryhmään kuuluu lämmönlähde, jolla ei ole kausiluonteista varastoa hyödynnettävänä eli ilma. Toiseen ryhmään kuuluvat lämmönlähteet, jotka perustuvat lämmön varastoitumiseen lämmönlähteeseen. Lämmönlähteitä ovat kallio, vesi ja maaperä. Kaikissa edellä mainituissa lämmönlähteissä lämmönlähteen luovuttama lämpöenergia perustuu auringon ja geotermisen energian varastoitumiseen lämmönlähteeseen. Kolmanteen ryhmään kuuluvat hukkaenergian hyödyntämiseen perustuvat lämmönlähteet joita ovat poistoilma, jätevesi ja teollisuuden jätevedet.

Kuten aiemmissa kappaleissa on todennettu, lämmönkeruulämpötilalla on suuri merkitys lämpöpumppuprosessin tuottoon. Eritoten ilmalla on suurin vaikutus tuoton vaihteluihin eri vuodenaikoina. Haittatekijänä on kuitenkin ilman alhainen tuottokapasiteetti kylmimpänä ajankohtana, jolloin rakennuksen tehontarve on huipussaan. [19, s. 17:16] Ilman lämpötilan vaihtelun sekä äkillisen ja melko pitkäaikaisen kylmenemisen vuoksi, ilmavesilämpöpumpulla ei voida tuottaa koko rakennuksen tarvitsemää lämpötehontarvetta. [19, s. 17:4] Lisäksi useimmat lämpöpumput lopettavat lämmityksen -20 asteen lämpötilassa. Tästä syystä ilma-vesilämpöpumppu järjestelmässä lisälämmitystarve on suurempi kuin esimerkiksi maalämpöjärjestelmässä. Ilmavesilämpöpumpussa energiaa saadaan talteen kuitenkin suoraan ilmasta. Höyrystimessä lämmönluoventajana toimii ilma ja lämmön vastaanottajana kylmäaine (neste).

Ilman lämpötila vaihtelee Suomessa vuodenajan ja sijainnin mukaan. Tässä työssä Suomi on jaettu kolmeen säävyöhykkeeseen. Yksi esitystapa lämpötilojen jakautumisesta vuodelle eri säävyöhykkeillä on esittää lämpötilat kumulatiivisen tuntikertymän avulla. Kuvassa 3.9 on esitetty lämpötilojen kumulatiivinen tuntikertymä kolmella säävyöhykkeellä Suomessa. Käyristä voidaan lukea kuinka kauan ympäristön lämpötila pysyy matalampana kuin vaaka-akselin lämpötila-arvo. Kuvaajasta nähdään esimerkiksi, että säävyöhykkeellä 1-2 lämpötila on alle 0 °C noin 2000 tuntia joka vuosi. [16, s. 12:10] Kuvan 3.9 ulkolämpötilojen tuntikertymä perustuu Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittaustuloksiin vuosilta 1980–2009. Kuvaajaa voidaan käyttää hyödyksi arvioitaessa energian tarvetta lämmityksessä. Kuva on toisella nimeltään pysyvyyskäyrä, jota hyödynnetään myös tämän työn SPF-lukujen laskennassa.

Ilma-vesilämpöpumppujen SPF-luvun laskennassa ulkolämpötila vastaa lämmönkeruupiirin lämpötilaa. Laskennassa käytettävät lämpötilavälit ilma-vesilämpöpumpuille kolmella eri säävyöhykkeellä on esitetty luvussa neljä taulukossa 4.3.



Kuva 3.9. Kumulatiivinen ulkolämpötilojen tuntikertymä Suomessa säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4. Tuntikertymä perustuu Ilmatieteen laitoksen säähavaintoasemien mittaustuloksiin vuosilta 1980–2009.

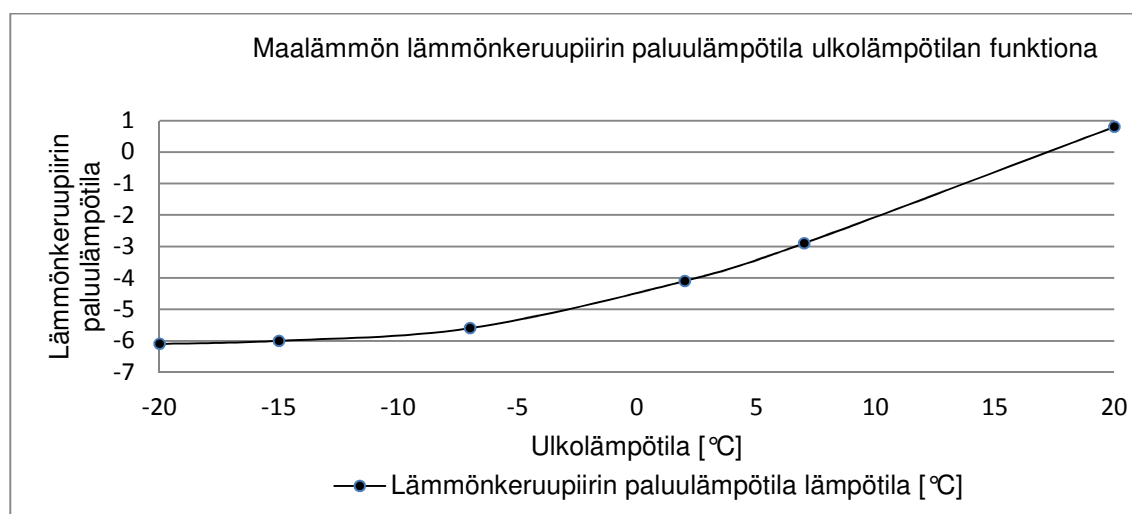
Maalämpö eli toiselta nimeltään geoenergia on maaperään ja kallioon varastoitunutta pääosin auringon luovuttamaa energiaa. Maalämpöpumpun keruupiirinä toimii kallio tai maaperä. Keruupiirinä toimiva maaperä tai kallio tarvitsee lämmönsiirtoaineen, jolla energia voidaan siirtää lämmönkeruupiiristä porakaivossa tai maapiirissä kiertävään keruuliuokseen. Lämmönkeruunesteellä tulee olla hyvä ominaislämpökapasiteetti, jotta maksimoidaan lämmön siirtyminen putkistossa virtaavaan keruuliuokseen. Lämmönkeruunesteenä käytetään etanolin ja veden sekoitusta. Lämmönkeruuneste virtaa suljetussa putkistossa.

Geoenergiaa voidaan kerätä maaperästä kahdella tavalla. Maakeruupiirijärjestelmässä suljettu lämmönkeruuputkisto asennetaan noin 1-1,5 metrin syvyyteen maaperään esimerkiksi pellolle. Maapiiritoteutus tarvitsee rakennuksen koosta riippuen melko suuren pinta-alan maakeruuputkiston asennukseen. Esimerkiksi yksi normaalin kokoinen omakotitalo tarvitsee noin 500 neliömetrin maa-alueen, johon asennetaan noin 300–400 metriä maakeruuputkistoa. Maapiirin pituus ja keruupiirin putkien halkaisija riippuu lämpöpumpun tehosta. Keruupiirimateriaalina käytetään muovia. Maahan asennettu keruuputkisto kerää lämpöä suoraan maaperästä. Talvella maaperän kosteus jäätyy ja muodostaa sylinterin maaputkiston ympärille. Tällöin suurin osa maaperästä kerätystä energiasta saadaan veden jäätyneen latentista lämmöstä. Usein järjestelmä suunnitellaan siten, että putkistossa kiertävän lämmönkeruunesteen lämpötila on noin -5 astetta

huippukulutuksen aikana. [16, s. 17:19] Maapiiriputkiston lämmönsiirtoteho on noin 20 W/m ja maapiiri pystyy tuottamaan energiaa vuodessa noin 30 kWh/m² [1]. Energian tuottoon vaikuttaa ensisijaisesti maaperän sulaminen kevääksi.

Porakaivojärjestelmässä lämpöenergiaa kerätään kallioon poratusta reiästä. Kallioon tehtyyn reikään asennetaan halkaisijaltaan pyöreä muovinen keruuputki. Keruuputkessa tulee ottaa huomioon tehokas lämmönsiirtopinta. Myös virtauksella on merkitystä lämmönsiirtymiseen. Keruuputken ja kallion väliin muodostuu vesipatsas. Kallioon sitoutunut energia siirtyy porakaivon veteen ja porakaivon vedestä puolestaan keruuputkistossa virtaavaan keruuliukseen. Porakaivon lämmönsiirtoteho on noin 30 W/m. Lämpöpumpun käydessä noin 4000 h vuodessa porakaivo tuottaa noin 120 kWh/m vuodessa. Vesi toimii siis porakaivossa lämmönsiirron väliaineena. Kesäaikana kallio kerää aurinkoenergiaa, ja toimii näin ollen suurena energiavarastona. Maalämpöpumpussa höyrystimessä lämmön luovuttajana toimii lämmönkeruuneste eli vesialkoholiseos ja energian vastaanottajana jälleen kylmäaine. Lauhduksessa tilanne on verrattavissa ilma-vesilämpöpumppuun.

Kuten ilman lämpötila myös maan lämpötila vaihtelee vuoden aikojen ja sijainnin mukaan. Maaperässä vaikuttavana tekijänä on myös syvyys. Pinnalla maaperän lämpötilanvaihtelu on alttiimpaa ilman lämpötilan vaihteluille. Vuoden keskimääräinen lämpötila Etelä-Suomessa on noin 5 astetta ja pohjoisessa puolestaan -2 astetta. Maanpinnan lämpötilan voidaan sanoa olevan noin kolme astetta vuoden keskilämpötilaa korkeampi. Syvemmillä maaperässä noin 15 metrin syvyydessä lämpötila on vuoden pintalämpötilojen keskiarvo. Etelä-Suomessa määrityksen mukaan on 6-10 astetta ja Pohjois-Suomessa puolestaan 2-3 astetta. Yli 15 metrissä lämpötila nousee noin 0,5-1 astetta sadalla metrillä. [20, s. 31] Maalämpöpumppujen SPF-luvun laskennassa ei voida hyödyntää suoraan ulkolämpötilaa, sillä lämmönkeruupiirinä toimii maaperä. Kuvassa 3.10 on esitetty maalämpöpumpun lämmönkeruupiirin paluulämpötila ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 3.10. Maalämpöpumppujen lämmönkeruupiirin paluulämpötila ulkolämpötilan funktiona. Tiedot perustuvat Aalto-yliopiston laskentamalliin.

Kuten ilma-vesilämpöpumpuissa, myös maalämpöpumppujen laskennassa laskentavuosi jaetaan lämpötilaväleille. Jokaista ulkolämpötilalla määritettyä lämpötilaväliä vastaa maalämmönkeruupiirin paluulämpötila. Paluulämpötila riippuu rakennuksen sijainnista. Laskennassa hyödynnetään yksityiskohtaisen laskentamallin arvoja kussakin lämpötilavälissä kaikilla säävyöhykkeillä. Arvot ovat laskentaohjelmassa muutettavissa. Laskennassa käytettävät lämpötilavälit ilma-vesilämpöpumpuille kolmella eri säävyöhykkeellä on esitetty luvussa neljä taulukossa 4.4.

4 LÄMPÖPUMPPUJEN SPF-LUVUN LASKENTA

SPF-luku voidaan laskea hyödyntäen eri laskentamenetelmiä. SPF-luvun laskentaan hyödynnetään *Ympäristöministeriön rakentamismääräyksen D5* mukaista yksityiskoh- taista laskentamenetelmää. Tässä kappaleessa määritetään SPF-luku ja tarkastellaan Aalto-yliopiston tekemää SPF-luvun laskentamallisovellusta, joka perustuu yksityiskoh- taiseen laskentamalliin. Laskentasovellusmalli on julkaistu nimellä *Lämpöpumppujen energialaskentaopas* (3.10.2012).[4]

4.1 Lämpöpumpun vuosihyötysuhde eli SPF-luku

SPF (Seasonal Performance Factor) on lämpöpumpun vuotuinen keskimääräinen läm- pökerroin, eli lämpöpumpulla tuotetun vuotuisen energian suhde lämpöpumpun ja apu- laitteiden vuotuisen sähkön kulutukseen. [20, s. 3]

$$SPF = \frac{\sum Q_{LP}}{\sum E} \quad (4.1)$$

jossa

SPF on lämpöpumpun lämmityksen vuosihyötysuhde

$\sum Q_{LP}$ on lämpöpumpun tuottama energia vuoden aikana

$\sum E$ on lämpöpumpun kompressorin ja apulaitteiden sähkönkulutuksen summa vuo- den aikana

SPF-luku on käyttäjälle ja järjestelmän ostajalle merkittävä luku, sillä lukema kertoo nettotuloksen vuoden toiminnasta. Luku toimii hyvänä arviointimenetelmänä järjestel- män kannattavuuden analysoinnissa [19, s. 17:4]. Käytännössä hyvä SPF-luku tarkoit- taa, että lämpöpumppu on toiminut hyvillä COP-luvuilla koko vuoden. Lämmityksessä merkityksellisiä asioita lämpöpumpun tehokkaaseen toimintaan ja hyvään hyötysuhde- lukemaan ovat lämmönjaossa lämpöhäviöiden minimointi, järjestelmän tyhjäkäynnin minimointi ja energiaa käyttävien laitteiden kuten pumppujen optimaalinen säätö. Läm- pöpumppuja ei yleensä mitoiteta kattamaan koko vuoden huipputehontarvetta. Usein on edullista varustaa järjestelmä toisella lämmönlähteellä, joka auttaa lämpöpumppua lämmittämisessä huippupakkasten aikana. Toista lämmönlähdettä kutsutaan lisäläm- mönlähteeksi. [19, s. 17:4,2] Lisälämmöntarve riippuu lämpöpumppulaitoksen koosta, tyypistä ja rakennuksen lämmitystehontarpeesta. Lisälämmöntarve otetaan huomioon lämmityksen SPF-luvussa. SPF-luku riippuu laskentamenetelmästä, mittauksista, läm-

pömpun mitoituksesta sekä rajapinnasta. Rajapinnalla tarkoitetaan SPF-luvussa huomioitava alue. SPF-luku voidaan laskea vain lämpöpumpulle, jolloin kyse on lämpöpumpun anto- ja ottoenergian suhteesta. Ottoenergiaan voidaan lisätä lämmönjakopuolen kulutus ja/tai lisälämmitykseen kuluva energia. Laskennassa eri lähtötiedot antavat eri SPF-lukuja. SPF-luku voidaan laskea hyödyntäen eri laskentamenetelmiä. Laskentamenetelmien lähtötietoina hyödynnetään laboratoriomittaustuloksia vuoden eri sääolosuhteissa. Laskentamenetelmissä voidaan myös hyödyntää kenttämittauksia, jolloin tulokset eroavat jälleen laboratoriomittaustulosuhteissa käytettävistä lähtöarvoista.

[18, s. 9]

Tässä työssä käytetty energiaoppaan laskentamalli perustuu standardiin EN 15316-4-2. Standardi on laskentamalli lämmitysjärjestelmän hyötysuhteen laskentaan. Laskennassa hyödynnettävä tieto, kuten lämpöpumpun lämmitysteho ja COP-kerroin ovat määritetty eurooppalaisen tai kansallisen testistandardin mukaan. Laskennassa otetaan huomioon SPF-lukuun vaikuttavia tekijöitä kuten kompressorityyppi, lämpöpumpputyypin lämmönlähde, lämmönjakopiiri, lämpöpumpun toimintamalli (on/off ja inverter) ja järjestelmän lämpöhäviöt. On/Off -lämpöpumpun toimintahäviöt katsotaan pieniksi ja merkityksettömiksi, mikäli käytössä ei ole muuta testitietoa. [3, s. 27] Standardissa on esitetty kaksi laskentamallia. Laskentamallit poikkeavat toisistaan käytettävien lähtötietojen osalta. Yksinkertaisessa laskentamallissa oletettu laskentajakso on lämmityskausi ja lämpöpumpun suorituskykytiedot ovat taulukoituja-, kiinteän teholuokan lämpöpumpujen suoritusarvoja. Käyttöolosuhteiden määrittelyn puuttuessa, laskenta ei ole tapauskohtaista. Yksityiskohtaisessa laskennassa voidaan ottaa huomioon yksittäisen lämpöpumpun toiminta eri käyttöolosuhteissa. [3, s. 27]

Yksityiskohtainen laskentamenetelmä on esitetty myöhemmässä vaiheessa. Laskentamallin vahvuuksia ovat sen laajuus ja sisällön perusteellisuus. Laskenta huomioi sekä lämmityksen että käyttöveden tuotannon ja mallia voidaan hyödyntää eri ilmasto-olosuhteissa rakennuskohtaisesti. Laskennassa ei ole välttämätöntä testata lämpöpumpua osatehokuormituksissa, mikäli käytössä on muita vaihtoehtoisia arvoja. Mallin avulla SPF-luku voidaan ratkaista eri rajauksin. Laskentamallin vahvuus voi olla myös sen heikkous. Laskennassa otetaan huomioon liian monta asiaa yhtäaikaaisesti. Lisäksi standardi viittaa moneen muuhun standardiin häviöiden laskennassa. Laskentamallissa tarvitaan suuri tietomäärä rakennuksesta. Laskennan monimutkaisuus voi aiheuttaa suurella todennäköisyydellä virheitä ja virheellisen tuloksen. Suuri laskennassa huomioitava tietomäärä aiheuttaa todennäköisesti suuren määrän arvioita. Arviot vaihtuvat tapauskohtaisesti ja tulokset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. [3, s. 36]

Laskentamallin avulla voidaan laskea SPF-luku ilma-, vesi- ja maalämpöpumpuille sekä niiden sovelluksille. Laskennassa otetaan huomioon lämmitys, lämpimän käyttöveden lämmitys ja näiden yhdistelmä sekä osatehoinen järjestelmätoiminta. Laskentamalli on

ajasta riippumaton. Mallissa otetaan huomioon lämmönkeruupiirin pumpun tai puhaltimen käynti, sulamisjakso, tyhjäkäyntihäviöt sekä päälle/pois-kapasiteetin säätely. [3, s. 23]

Ruotsalainen tutkimusinstituutti SP Technical Reseach on tutkimusprojektissa pyrkinyt selvittämään, mitä asioita laskentamenetelmään tulee sisällyttää todellisen SPF-luvun saamiseksi. Mittauksissa on ollut mukana muun muassa ilma-vesilämpöpumppuja ja maalämpöpumppuja. Tutkimuksen aikana kenttämittauslaitteet ovat keränneet tietoa minuutin välein. Tuloksissa on hyödynnetty yhden päivän mittaustulosten keskiarvolukemaa. Maalämpöpumppumittauksissa on ollut mukana kaksi IVT maalämpöpumppua, yksi Thermia maalämpöpumppu, yksi Nibe maalämpöpumppu ja yksi Alvatek maalämpöpumppu. [3, s. 13] Järjestelmät olivat asennettuna vuosien 1998–2003 aikana Boråsin ja Kinnan kaupunkeihin. [21, s. 4]. Mittaustulokset ovat kerätty aikajaksolta 16.11. 2003–14.11. 2004. [21, s. 13]. Taulukossa 4.1 on esitetty kohteiden lähtötiedot ja taulukossa 4.2 on esitetty mittausvuoden tulokset. Lämpöpumpuilla lämmitetään patteriverkostoa ja käyttövedettä. Lämpöpumppujen vuosilämpökerroin on laskettu kaavalla (4.2).

$$SPF = \frac{\sum(Q_{\text{lämmitys}} + Q_{kv})}{\sum E_{\text{kok.}}} \quad (4.2)$$

jossa

SPF	on järjestelmän vuosihyötysuhde
$Q_{\text{lämmitys}}$	on kulutettu lämmitysenergia lämmitykseen
Q_{kv}	on kulutettu lämmitysenergia käyttöveden lämmitykseen
$E_{\text{kok.}}$	on kokonaissähkönkulutus lämmityksessä [21, s. 12]

Taulukko 4.1. Ruotsalaisen tutkimuskeskuksen teettämän maalämpöpumppujen kenttämittauksen viiden kohteen lähtötiedot. [21, s. 10]

	A	B	C	D	E
Rakennus	1971, 198 m ²	1972, 390 m ²	1970, 184 m ²	1950-luku, 375 m ²	1955, 370 m ²
Lämmitysmuoto	Yhdistelmäkattila (öljy/sähkö)	Öljykattila	Öljykattila	Öljykattila	Öljykattila
Lämmitysenergian tarve [MWh]	29,4	36,5 (4,5 m ³ öljyä/vuosi)	20,3 (2,5 m ³ öljyä/vuosi)	40,6 (5 m ³ öljyä/vuosi)	32,5 (4 m ³ öljyä/vuosi)
Asennusvuosi	2003	1999 (2002:vaihto)	1998	2003	2002
lämpöpumpun nimellisteho (0/50 °C)/lisäteho [kW]	6,6/6	10,9/23,3 (0/45 °C)	6,6/6 (0/45 °C)	10,5/9	7,1/9
Porakaivon aktiivisyys [m]	130	168	92	170	139
Lämmönjako	patteri	patteri	patteri	patteri	patteri

Kohteessa A asuu neljä henkilöä. Lämpöpumpun antoteho ulkolämpötilalla 0 °C ja menoveden lämpötilalla 50 °C on 6,6 kW. Lisälämmityksenä toimii kaksiportainen 6 kW:n sähkövastus. Lämpöpumppujärjestelmään kuuluu erillinen 300 litran käyttövesivaraaja. Menoveden lämpötila on 38–39 astetta ulkolämpötilan ollessa 0 astetta. Lämpöpumpussa on kierukkakompressori. [21, s. 52, 53]

Kohteessa B asuu neljä henkilöä. Lämpöpumppu on kytketty öljykattilan rinnalle. Öljykattilan nimellisteho on 23,3 kW (225 l). Lämpöpumpun antoteho ulkolämpötilalla 0 °C ja menoveden lämpötilalla 45 °C on 10,1 kW. Öljykattila toimii järjestelmän puskurivaraajana ja lisälämmönlähteenä. Öljykattilassa on käyttöveden esilämmityskierukka, josta käyttövesi johdetaan erilliseen käyttöveden tulistusvaraajaan. Käyttöveden tulistusvaraaja on Jäspi VLM 160, jossa on 6 kW:n sähkövastus. [21, s. 54, 55]

Kohteessa C asuu kaksi henkilöä. Lämpöpumpun antoteho ulkolämpötilalla 0 °C ja menoveden lämpötilalla 45 °C on 6,6 kW. Lisälämmityksenä toimii 6 kW:n sähkövastus. Käyttövesivaraajan tilavuus on 150 l. Käyttövettä lämmitetään vaihtoventtiilin kautta eriaikaisesti patteriverkoston lämmityksen kanssa. Menoveden lämpötila on 34–35 astetta ulkolämpötilan ollessa 0 astetta. [21 s. 57, 58]

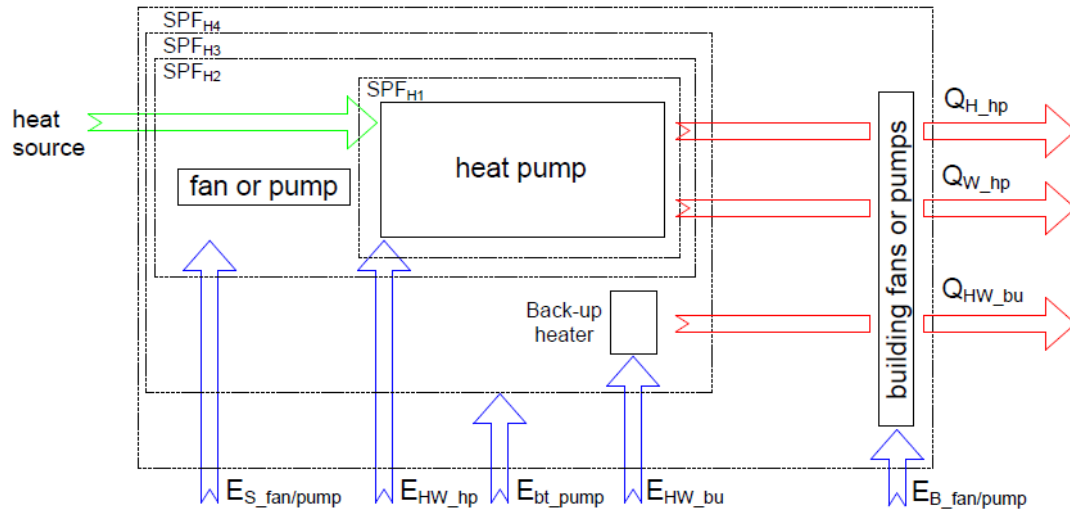
Kohteessa D asuu neljä henkilöä. Lämpöpumpun antoteho ulkolämpötilalla 0 °C ja menoveden lämpötilalla 50 °C on 10,9 kW. Lisälämmityksestä huolehtii kolmiportainen 9 kW:n sähkövastus. Lämpöpumpussa on kierukkakompressori. Käyttövesivaraaja on erillisenä yksikkönä ja sen tilavuus on 300 l. Menoveden lämpötila on 35–40 astetta ulkolämpötilan ollessa 0 astetta. [21, s. 59–61]

Kohteessa E asuu kolme henkilöä. Lämpöpumpun antoteho ulkolämpötilalla 0 °C ja menoveden lämpötilalla 50 °C on 7,1 kW. Lisälämmityksestä huolehtii kolmiportainen 9 kW:n sähkövastus. Käyttövesivaraajan tilavuus on 160 l. Menoveden lämpötila on 39 astetta ulkolämpötilan ollessa 0 astetta. [21, s. 62–64]

Taulukko 4.2. Ruotsalaisen tutkimuskeskuksen teettämän maalämpöpumppujen kenttämittauksen viiden kohteen mittaustulokset. [21, s. 14]

	A	B	C	D	E
Lämmitysenergiankulutus [MWh]	23,4	28,2	17,5	42,3	37,2
Lämpimän käyttöveden kulutus [kWh]	4006	1924	1045	1379	1765
Sähkö- ja lisäenergiankulutus [kWh]	10066	11867	7348	15299	15967
Vuoden keskilämpötila ulkona [°C]	5,8	7,3	5,2	6,9	4,7
sisälämpötila [°C]	20,7	20,3	19,9	21,3	20,9
SPF (lämmitys+kv)	2,7	2,5	2,5	2,9	2,4

SPF-luku voidaan laskea eri lämmitysjärjestelmätasolle. Tasot voidaan määrittellä rajaamalla laskettava alue. Tasot on esitetty kuvassa 4.1. SPF-luku voidaan määrittää jokaiselle laskentatasolle erikseen (SPF1-SPF4). Rajausmalli on kehitetty eurooppalaisessa SEPEMO projektissa. Projektin tarkoituksena on ollut luoda yhteinen toimintamalli lämpöpumppujen kenttämittauksille ja SPF-luvun laskennalle, kerätä ja arvioida tehdyt lämpöpumppujen kenttämittaustiedot sekä arvioida tehtyjä kenttämittausmalleja ja laskentamalleja. [3]



Kuva 4.1. Ruotsalaisen tutkimusinstituutti SP Technical Research teettämän tutkimuksen mittaus- ja laskentaraajat lämpöpumpun SPF-lukujen määrittämisessä. [3, s. 17]

Lämpöpumpun SPF-luvun laskennan rajausta voidaan verrata E-luvun taselaskennan rajoihin, joissa rajapintana toimii rakennuksen ulkopinta. SPF 1 rajoina toimii vain lämpöpumppu. SPF 2 rajoina ovat lämpöpumppu sekä lämmönkeruupiirin pumppu tai puhallin. SPF 3 rajoina ovat lämpöpumppu lämmönkeruupiirin pumppu tai puhallin sekä lisäenergian lähde. SPF 4 luvussa on kaikkien edellä mainittujen lisäksi lämmönjakopiirin kiertovesipumppu. [21]

SPF-luvun määrittämiseksi on selvitettävä minimimäärä tietoa järjestelmästä. Tarvittavia tietoja lämpöpumppujärjestelmässä ovat kokonaissähkönkulutus, lisälämmönlähteen energiankulutus, keruupiirin pumppujen ja/tai puhaltimien energiankulutus, lämmönjakopiirin kiertovesipumppujen ja/tai puhaltimien energiankulutus, kokonaislämmitysenergian tuotto, käyttöveden energiankulutus, lämmönkeruupiirin meno- ja paluueden lämpötilat, käyttöveden lämpötila, lämmönkeruupiirin meno- ja paluulämpötilat, ulkolämpötila sekä sisälämpötila. Tässä työssä SPF-luvun laskenta sisältää lämpöpumpun, keruupuolen kiertovesipumpun tai puhaltimen sekä lisälämmitysenergian. Lämmitysjärjestelmän häviöiden laskenta sisältyy rakennuksen energiataaselaskentaan. Laskentaraajat vastaa SEPAMO projektin järjestelmärajasta SPF 3.

4.2 Yksityiskohtainen laskentamenetelmä

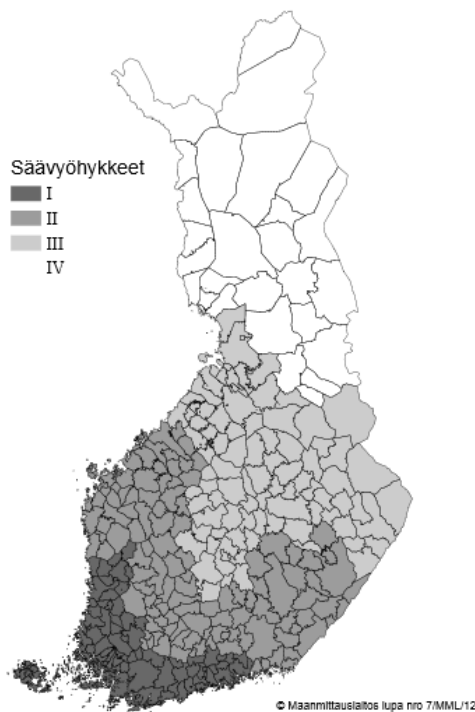
SPF-luvun määrittämiseen hyödynnetään *Ympäristöministeriön rakentamismääräyksen D5* mukaista yksityiskohtaista laskentamenetelmää. Laskentamenetelmä perustuu standardiin *SFS-EN 15316-4-2 Rakennusten lämmitysjärjestelmät. Järjestelmien energia-vaatimusten ja järjestelmätehokkuuden laskenta. osa 4-2: lämmöntuottojärjestelmät. lämpöpumppujärjestelmät*. Standardin pohjalta on laadittu suomenkielinen lämpöpumpun energialaskentaopas (3.10.2012), jota ovat olleet tekemässä tutkija Lari Eskola,

erikoistutkija Juha Jokisalo ja professori Kai Siren.[4] Lämpöpumppujen energialaskenta-
taapas on keskeisessä roolissa tässä diplomityössä.

SPF-lukujen laskentaan on tehty tämän työn yhteydessä laskentaohjelma, joka perustuu
lämpöpumppujen energialaskentaoppaan laskentamalliin. Työssä esitetään laskentaop-
paasta hyödynnettävä laskentakokonaisuus sekä poikkeamat. Laskentaohjelman luotet-
tavuus on merkittävässä roolissa tässä työssä. Tästä syystä laskentaosuudet, joihin SPF-
luvut pohjautuvat on selvitetty lukijalle yksityiskohtaisesti ja välitulokset on esitetty
taulukoissa ja erillisissä kuvaajissa. Yksityiskohtainen SPF-luvun laskenta tehdään Jä-
mä-Moon ilma-vesilämpöpumpuille sekä Jämä Star maalämpöpumpuille. Lämmönke-
ruupiirinä toimii ulkoilma ja kallio.

Laskennassa Suomi on jaettu kolmeen laskentaosaan joita ovat Etelä-Suomi, Keski-
Suomi sekä Pohjos-suomi (kuva 4.2). Laskennassa sekä tulosten tarkastelussa vyöhyk-
keistä käytetään numeromääritelmiä 1-2, 3 ja 4. Tässä kappaleessa esitetään kummankin
lämpöpumpputyypin laskennan kulku ja lähtötiedot.

Lämpöpumppujen SPF-luvun yksinkertainen laskentamenetelmä perustuu pysyvyys-
käyrämenetelmään. Pysyvyyskäyrät kuvaavat vuoden ulkolämpötilan tuntikertymää
kussakin säävyöhykkeessä. Kumulatiivinen ulkolämpötilojen tuntikertymä Suomessa,
kolmella eri säävyöhykkeellä, on esitetty kuvassa 3.9 sivulla 24.



Kuva 4.2. Suomen säävyöhykejako. [22, s. 22]

Laskennan lähtötietoja ovat lämpöpumpun valmistajan tuotetiedot, rakennuksen lämmi-
tys- ja käyttöveden lämmitysenergiankulutus, käyttöveden lämpötila, lämpöpumpun

alarajalämpötila sekä sisälämpötila. SPF-luvut eli lämpöpumpun vuotuinen anto- ja ottoenergian suhde lasketaan Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumpuille sekä Jämä Star maalämpöpumpuille kolmella eri säävyöhykkeellä kolmella eri menoveden lämpötilalla. Rakennuksen lämmityksen ja käyttöveden SPF-lukuja tarkastellaan erillisinä lukuina. Laskenta on jaettu kolmeentoista laskentaosaan. Tässä kappaleessa esitetään lämpöpumppujen energialaskentaoppaassa esitetyt laskentakaavat, joita hyödynnetään SPF-lukujen määrittämiseen ja joiden käyttö poikkeaa laskentaoppaan mallista. Laskennassa hyödynnettävät lähtötiedot on esitetty erillisissä taulukoissa sekä ilma-vesilämpöpumpuille että maalämpöpumpuille. Samaa laskentamallia käytetään sekä maalämpöpumppujen että ilma-vesilämpöpumppujen SPF-lukujen laskennassa. Työn laskentajärjestys poikkeaa hieman oppaassa esitetystä laskentajärjestyksestä. Energiaoppaan ohjeiden mukaisesti toteutetut vaiheet on esitetty sanallisesti ilman kaavoja. Ilma-vesi- ja maalämpöpumppumallien laskennassa hyödynnettävät valmistajan julkaisemat tuotetiedot on esitetty liitteissä 1-2.

4.2.1 Lämpötilavälit

Pysyvyyskäyrämenetelmässä vuotuinen lämmitysenergia, lämpöpumpun tuottama energia ja lisälämmitysenergia jaetaan lämpötilaväleille. Lämpötilavälit on jaettu standardin SFS-EN 14511-2 mukaisesti käyttäen mittapisteinä -20 °C, -15 °C, -7 °C, 2 °C, 7 °C ja 20 °C. Mittapisteille on valittu ylä- ja alarajalämpötilat, jotka määrittävät lämpötilavälin lämpötilarajat. Lämpötilaväli mittauspisteessä -20 °C riippuu säävyöhykkeestä. Ilma-vesilämpöpumppujen ja maalämpöpumppujen lämpötilavälit sekä lämpötilavälien lämmönkeruupiirin ylä- ja alarajalämpötilat on esitetty taulukoissa 4.3 ja 4.4.

Taulukko 4.3. Laskennassa käytettävät lämpötilavälit ilma-vesilämpöpumpuille kolmella eri säävyöhykkeellä.

Säävyöhyke 1-2

Toimintalämpötilat, ulkoilman lämpötila, TL1-TL6, [°C]	- 20	- 15	- 7	2	7	20
Lämpötilavälin alaraja, Tar, [°C]	- 22	- 18	- 11	- 2	4	14
Lämpötilavälin yläraja, Tyr, [°C]	- 18	- 11	- 2	4	14	28

Säävyöhyke 3

Toimintalämpötilat, ulkoilman lämpötila, TL1-TL6, [°C]	- 20	- 15	- 7	2	7	20
Lämpötilavälin alaraja, Tar, [°C]	- 29	- 18	- 11	- 2	4	14
Lämpötilavälin yläraja, Tyr, [°C]	- 18	- 11	- 2	4	14	28

Säävyöhyke 4

Toimintalämpötilat, ulkoilman lämpötila, TL1-TL6, [°C]	- 20	- 15	- 7	2	7	20
Lämpötilavälin alaraja, Tar, [°C]	- 35	- 18	- 11	- 2	4	14
Lämpötilavälin yläraja, Tyr, [°C]	- 18	- 11	- 2	4	14	28

Taulukko 4.4. Laskennassa käytettävät lämpötilavälit maalämpöpumpuille.

Toimintalämpötilat, ulkoilman lämpötila, TL1-TL6, [°C]	- 20	- 15	- 7	2	7	20
Lämmönlähteen lämpötila, Th1, [°C]	- 6,1	- 6	- 5,6	- 4,1	- 2,9	0,8

Kullakin lämpötilavälillä on toimintalämpötila ja kaikilla lämpötilaväleillä on toimintaylä- ja alaraja. Kaikille lämpötiloille on kumulatiivinen tunti- ja astetuntikertymä. Arvoja tarvitaan myöhemmissä laskentavaiheissa. Arvot perustuvat vuoden 2012 Suomen energialaskennan referenssivuoden tuntikohtaisiin ulkolämpötiloihin. Maalämpöpumpuissa käytetään samaa lämmönkeruupiirin lämpötilaa kaikilla säävyöhykkeillä. Laskenta ohjelmasovelluksessa lämmönkeruun lämpötilat ovat muutettavissa.

4.2.2 Lämpötilakorjattu COP-luku

Suunnitteluparametrit määritetään valmistajan antamista tuotetiedoista. Suunnitteluparametreja ovat lämpöpumpun COP-luku sekä lämpöpumpun anto- ja ottoteho mitatuissa ulkolämpötiloissa. Tuotetietojen mitatut arvot eivät riitä COP-luvun väliarvojen ratkaisemiseen interpoloimalla. Tästä syystä COP-luku korjataan Carnot-lämpökertoimen avulla.

Carnot-lämpökerroin lasketaan kaikille lämpötilaväleille menoveden lämpötiloilla 35 °C, 45 °C ja 50 °C. Lämpöpumpun Carnot-lämpökerroin lasketaan kaavalla (4.1). Carnot-lämpökerroin kuvaa yksinkertaisimman palautuvan kiertoprosessin hyötysuhdetta, jonka avulla pystytään määrittämään teoreettinen COP-kerroin kaikille lämpötilaväleille kolmella menoveden lämpötilalla. Lämpöpumpun lauhtumis- ja höyrystymislämpötila on ratkaistu kaavojen (4.2) ja (4.3) avulla. Höyrystimen ja lauhtuttimen asteisuusuksina käytetään oletusarvona energiaoppaan mukaisia arvoja. Energiaoppaassa ratkaisumalli vastaa mallia ”Yksi tunnettu toiminnan lämpötilataso”. Carnot-lämpökerroin saadaan ratkaistua muotoon (4.4). Ilma-vesilämpö- ja maalämpöpumpujen Carnot-kertoimet ovat esitetty kuvissa 4.4 ja 4.5. Lämpöpumpuprosessin lämpötilat on selvitetty kuvassa 4.3.

$$COP_C = \frac{T_L}{T_L - T_H} \quad (4.1)$$

$$T_L = T_m + \Delta T_L, \text{ missä } \Delta T_L = 10 \text{ K} \quad (4.2)$$

$$T_H = T_u - \Delta T_H, \text{ missä } \Delta T_H = 8 \text{ K (ilma-vesi), } 5 \text{ K (maa)} \quad (4.3)$$

$$COP_C = \frac{(T_m + \Delta T_L)}{((T_m + \Delta T_L) - (T_u - \Delta T_H))} \quad (4.4)$$

jossa

COP_C on Carnot-lämpökerroin

T_L on lämpöpumpun lauhtumislämpötila

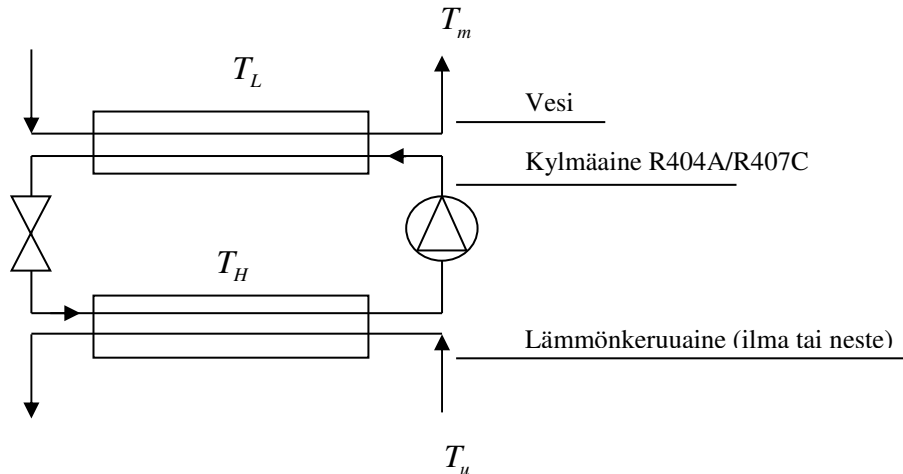
T_H on lämpöpumpun höyrystymislämpötila

T_m on lämmönjakopiirin menoveden lämpötila

T_u on lämmönlähteen paluulämpötila

ΔT_L on kylmäaineen ja veden lämpötilaero lauhduttimessa

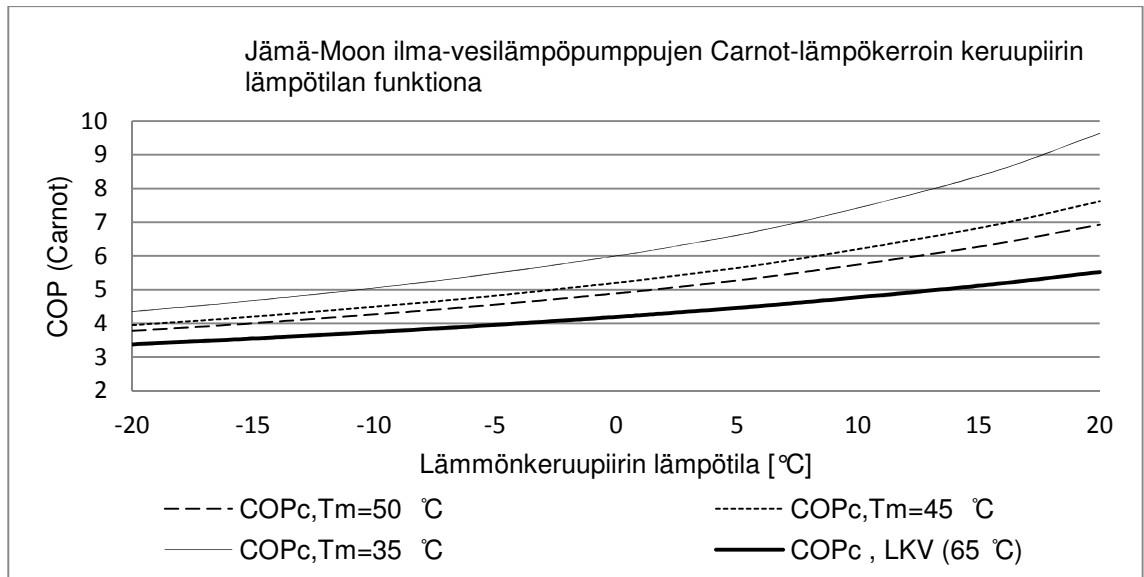
ΔT_H on kylmäaineen ja lämmönkeruuaineen (neste, ilma) lämpötilaero höyrystimessä



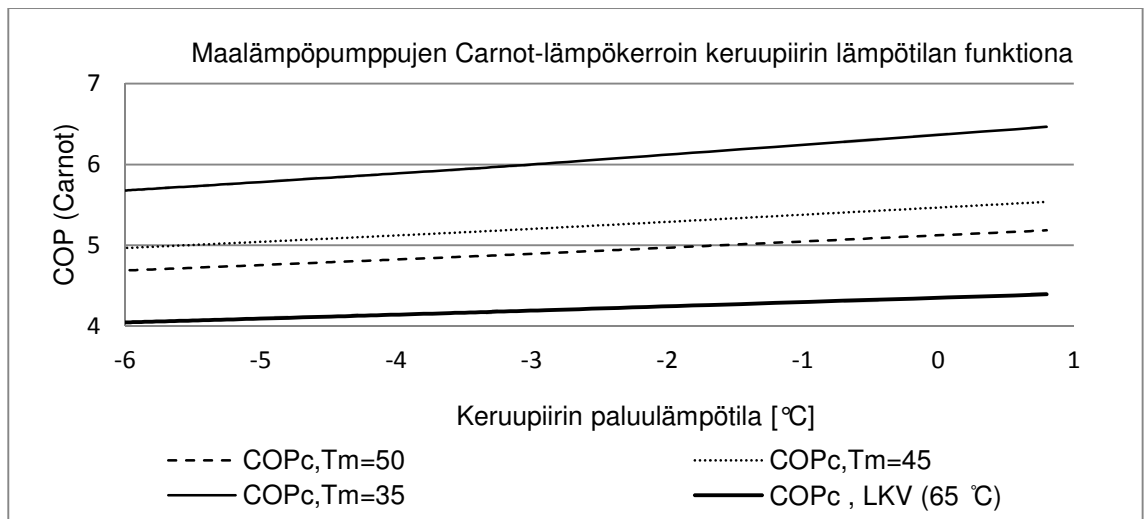
Kuva 4.3. Lämpöpumpunprosessin periaatekaavio.

Carnot-kertoimeen vaikuttaa lämmönkeruupiirin ja lämmönjakopiirin lämpötila. Kuvissa 4.4 ja 4.5 on esitetty Carnot-lämpökerroin neljällä lämmönjakolämpötilalla lämmönkeruu lämpötilan funktiona ilma-vesi- ja maalämpöpumpuille. Yksi lämmönjakolämpötila on käyttöveden lämpötila, joka asetetaan lähtötietoihin. Laskennassa oletetaan, että ilma-vesilämpöpumpuissa kylmäaineen ja lämmönsiirtoaineen välinen lämpötilaero lauhduttimessa on 10 astetta ja höyrystimessä 8 astetta. Maalämpöpumpuissa kylmäaineen ja lämmönsiirtoaineen välinen lämpötilaero höyrystimessä on puolestaan 5 astetta. Kuvista 4.4 ja 4.5 nähdään, että lauhduttimen lämpötilalla ja höyrystimen paluulämpötilalla on suuri merkitys lämpöpumpun lämmitystehtävään. Mitä pienempi lämpötilaero lauhduttimen ja höyrystimen välillä on sitä parempi lämpökerroin ja antoteho.

Lämpöpumpun energiaoppaassa lämpötilaero lauhduttimessa vakioidaan riippumatta menoveden lämpötilasta. Lämpötilaeroon lauhduttimessa vaikuttaa lämpöpumpun antoteho. Laskentamalli perustuu tuotetietoihin, joiden avulla ratkaistaan lämpöpumpun antoteho ja COP-kerroin halutuissa ulkolämpötiloissa. Tässä laskentamallissa on tehty vakiointi lämpötilaerossa, jotta on pystytty määrittämään teoreettinen antoteho useassa lämmönkeruupiirin lämpötilassa tuotetietoihin perustuen. Lämpötilaero lauhduttimessa on mahdollista ratkaista, mikäli tunnetaan lämpöpumpun antoteho useassa pisteessä.



Kuva 4.4. Ilma-vesilämpöpumppujen Carnot-lämpökertoimet neljällä lämmönjakolämpötilalla.



Kuva 4.5. Maalämpöpumppujen Carnot-lämpökertoimet neljällä lämmönjakolämpötilalla.

Carnot lämpökerroin ei kuvaa todellista tilannetta, sillä ideaaliprosessin oletetaan olevan häviötön. Tuotetiedoista saatujen COP-lukujen sekä laskettujen Carnot-lämpökertoimien avulla pystytään määrittämään lämpöpumpun häviöt häviökertoimen avulla. Lämpöpumpun häviökerroin on mitatun COP-luvun ja Carnot-lämpökertoimen suhde, kaava (4.5). Lämpöpumpun häviökertoimen tarkkuus riippuu mittapisteiden lukumäärästä.

$$f_T = \frac{COP_M}{COP_C} \quad (4.5)$$

jossa

f_T on lämpöpumpun häviökerroin

COP_M on standardiolosuhteissa mitattu lämpökerroin

COP_C on Carnot- lämpökerroin

Ilma-vesilämpöpumpuissa häviökertoimena käytetään eri ulkolämpötiloissa ja eri menoveden lämpötiloilla laskettujen häviökertoimien keskiarvoa. Ilma-vesilämpöpumppujen häviökertoimet on esitetty taulukoissa 4.5–4.7. Laskentatyökalussa ilma-vesilämpöpumppujen häviökertoimet on ratkaistu painotetulla keskiarvolla eri ulkolämpötilojen kesto huomioiden. Tuloksista huomattiin, että keskiarvotuloksessa ja painotetun keskiarvon tuloksessa ei ole suurta eroa. Syynä tulokseen on -20 asteen pieni tuntimäärä suhteutettuna koko vuoden tuntimäärään.

Tuotetiedoissa ei ole mitattuja pisteitä käyttövedelle. Käyttöveden häviökertoimena käytetään eri ulkolämpötiloissa laskettujen häviökertoimien keskiarvoa menoveden lämpötilalla 50 astetta.

Lämpöpumpun häviökerroin laskennan tarkkuuteen vaikuttaa mittapisteiden lukumäärä eri menoveden ja keruupiirin lämpötiloissa. Jämä lämpöpumpuissa tuotetietojen mittapisteiden lukumäärä vaihtelee eri ulkolämpötiloissa sekä eri menoveden lämpötiloissa. Ilma-vesilämpöpumppujen laskennassa häviökertoimet ovat kerrottu teoreettisella varmuustekijäarvolla 0,85. Kerroin ei sisälly energiaoppaan laskentamalliin.

Taulukko 4.5. Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen häviökertoimet menoveden lämpötilassa 50 °C tuotetietojen pisteissä.

$T_{\text{Lämmön keruu}} [^{\circ}\text{C}]$	6 kW, $T_m=50^{\circ}\text{C}$	8 kW, $T_m=50^{\circ}\text{C}$	10 kW, $T_m=50^{\circ}\text{C}$	14 kW, $T_m=50^{\circ}\text{C}$	LKV
- 20	0,37	0,42	0,42	0,40	
- 7	0,36	0,46	0,48	0,44	
2	0,54	0,49	0,50	0,46	
7	0,55	0,56	0,58	0,52	
Keskiarvo	0,41	0,44	0,45	0,41	0,43

Taulukko 4.6. Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen häviökertoimet menoveden lämpötilassa 45 °C tuotetietojen pisteissä.

$T_{\text{Lämmön keruu}} [^{\circ}\text{C}]$	6 kW, $T_m=45^{\circ}\text{C}$	8 kW, $T_m=45^{\circ}\text{C}$	10 kW, $T_m=45^{\circ}\text{C}$	14 kW, $T_m=45^{\circ}\text{C}$
- 7	0,459	0,484	0,505	0,468
0	0,509	0,461	0,513	0,478
7	0,607	0,578	0,592	0,539
Keskiarvo	0,46	0,44	0,46	0,43

Taulukko 4.7. Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen häviökertoimet menoveden lämpötilassa 35 °C tuotetietojen pisteissä.

$T_{\text{Lämmönkeruu}} [^{\circ}\text{C}]$	6 kW, $T_m=35^{\circ}\text{C}$	8 kW, $T_m=35^{\circ}\text{C}$	10 kW, $T_m=35^{\circ}\text{C}$	14 kW, $T_m=35^{\circ}\text{C}$
2	0,53	0,56	0,54	0,49
7	0,66	0,61	0,58	0,54
keskiarvo	0,51	0,50	0,48	0,44

Maalämpöpumpuissa häviökerroin on laskettu keruulämpötilalla 0 °C kolmelle eri menoveden lämpötilalle. Maalämpöpumppujen häviökertoimet on esitetty taulukossa 4.8.

Taulukko 4.8. Jämä Star maalämpöpumppujen häviökertoimet menoveden lämpötiloissa 35 °C, 45 °C ja 50 °C tuotetietojen pisteissä.

$T_m=50$	Häviökerroin	$T_m=45^{\circ}\text{C}$	Häviökerroin	$T_m=35^{\circ}\text{C}$	Häviökerroin
6 kW	0,60	6 kW	0,65	6 kW	0,70
8 kW	0,62	8 kW	0,66	8 kW	0,71
10 kW	0,61	10 kW	0,66	10 kW	0,70
12 kW	0,57	12 kW	0,61	12 kW	0,67
15 kW	0,60	15 kW	0,63	15 kW	0,66
17 kW	0,60	17 kW	0,62	17 kW	0,64

Häviökertoimen avulla pystytään laskemaan lämpötilakorjattu COP-kerroin, jota tarvitaan myöhemmissä laskentavaiheissa. Lämpötilakorjattu COP-luku on Carnot-lämpökertoimen ja häviökertoimen tulo, kaava (4.6). Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen lämpötilakorjatut COP-kertoimet on esitetty taulukossa 4.9. Jämä Star maalämpöpumppujen lämpötilakorjatut COP-kertoimet on esitetty taulukossa 4.10.

$$COP_L = COP_C \overline{f}_T \quad (4.6)$$

jossa

\overline{f}_T on häviökerroin

COP_M on standardimitattu lämpökerroin (tuotetiedoissa)

COP_L on lämpöpumpun korjattu lämpökerroin

Taulukko 4.9. Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen lämpötilakorjatut COP-kertoimet.

Lämpöpumppu	Ulkolämpötila [°C]	- 20	- 15	- 7	2	7	20
Jämä-Moon 6 kW	Tm=50 °C	1,6	1,7	1,8	2,1	2,3	2,9
Jämä-Moon 6 kW	Tm=45 °C	1,8	1,9	2,2	2,5	2,7	3,5
Jämä-Moon 6 kW	Tm=35 °C	2,2	2,4	2,7	3,2	3,5	4,9
Jämä-Moon 8kW	Tm=50 °C	1,7	1,8	1,9	2,2	2,4	3,0
Jämä-Moon 8kW	Tm=45 °C	1,7	1,8	2,1	2,4	2,6	3,4
Jämä-Moon 8kW	Tm=35 °C	2,2	2,3	2,6	3,1	3,4	4,8
Jämä-Moon 10kW	Tm=50 °C	1,7	1,8	2,0	2,3	2,4	3,1
Jämä-Moon 10kW	Tm=45 °C	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	3,5
Jämä-Moon 10kW	Tm=35 °C	2,1	2,2	2,5	3,0	3,3	4,6
Jämä-Moon 14 kW	Tm=50 °C	1,6	1,6	1,8	2,1	2,2	2,8
Jämä-Moon 14 kW	Tm=45 °C	1,7	1,8	2,0	2,3	2,5	3,3
Jämä-Moon 14 kW	Tm=35 °C	1,9	2,1	2,3	2,7	3,0	4,2
LKV	65 °C	1,6	1,6	1,8	2	2	2,2

Taulukko 4.10. Jämä Star maa lämpöpumppujen lämpötilakorjatut COP-kertoimet.

	Lämmönkeruupiirin paluulämpötila [°C]	- 6,1	- 6	- 5,6	- 4,1	- 2,9	0,8
Lämpöpumppu	Ulkolämpötila [°C]	20	- 15	- 7	2	7	20
Jämä Star 6 kW	Tm=50 °C	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,1
Jämä Star 6 kW	Tm=45 °C	3,2	3,2	3,2	3,3	3,4	3,6
Jämä Star 6 kW	Tm=35 °C	4,0	4,0	4,0	4,1	4,2	4,5
Jämä Star 8kW	Tm=50 °C	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,2
Jämä Star 8kW	Tm=45 °C	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,7
Jämä Star 8kW	Tm=35 °C	4,0	4,0	4,1	4,2	4,3	4,6
Jämä Star 10kW	Tm=50 °C	2,9	2,9	2,9	3,0	3,0	3,2
Jämä Star 10kW	Tm=45 °C	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,6
Jämä Star 10kW	Tm=35 °C	4,0	4,0	4,0	4,1	4,2	4,5
Jämä Star 12 kW	Tm=50 °C	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9
Jämä Star 12 kW	Tm=45 °C	3,0	3,0	3,1	3,1	3,2	3,4
Jämä Star 12 kW	Tm=35 °C	3,8	3,8	3,8	3,9	4,0	4,3
Jämä Star 15 kW	Tm=50 °C	2,8	2,8	2,8	2,9	3,0	3,1
Jämä Star 15 kW	Tm=45 °C	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	3,5
Jämä Star 15 kW	Tm=35 °C	3,7	3,7	3,8	3,9	4,0	4,3
Jämä Star 17 kW	Tm=50 °C	2,8	2,8	2,8	2,9	2,9	3,1
Jämä Star 17 kW	Tm=45 °C	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,4
Jämä Star 17 kW	Tm=35 °C	3,6	3,6	3,6	3,7	3,8	4,1
LKV	55C	2,4	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6

Maalämpöpumppujen lämpötilakorjatut lämpökertoimet ovat korkeammat verrattuna ilma-vesilämpöpumpun kertoimiin. Syynä melko suureen eroon on ilma- ja maalämpöpumppujen lämmönkeruupiirien lämpötilaero lämpötilaväleillä. Lämpöpumpun COP-

lukuun vaikuttaa meno- ja paluueden ero lauhduttimessa. Tässä työssä lämpötilaero on vakioitu ja perustuu tuotetietojen mitattuun lämpötilaeroon. Mittapisteessä meno- ja paluueden lämpötilaero on 5 astetta sekä ilma-vesilämpöpumppujen että maalämpöpumppujen laskennassa.

Lämpötilakorjatut lämpökertoimet toimivat Jämä-Moon ja Jämä Star lämpöpumppujen lämpökertoimina laskennassa käytettävissä lämpötilaväleissä kolmessa menoveden sekä käyttöveden lämpötilassa. Käyttöveden häviökertoimena käytetään eri ulkolämpötiloissa laskettujen häviökertoimien keskiarvoa menoveden lämpötilalla 50 astetta. Käyttöveden lämpötilakorjattu COP-luku on puolestaan Carnot-kertoimen ja häviökertoimen tulo. Huomioitavaa on, että Carnot-kerroin on ratkaistu asetusarvolämpötilalla, joka saattaa olla eri lämpötila, millä häviökerroin on ratkaistu. Lämpökertoimet eivät vastaa standardiolosuhteissa mitattuja COP-lukuja.

4.2.3 Lämpöpumpun anto- ja ottoteho

Lämpöpumppujen antotehot tulee määrittää kaikille lämpötilaväleille erikseen. Lämpöpumpun antoteho ratkaistaan lämpötilakorjatun COP-luvun ja ottotehon avulla kaavan (4.7) mukaan.

$$LP_{ANTO} = COP_L \cdot \overline{LP_{OTTO}} \quad (4.7)$$

jossa

$$\begin{array}{ll} LP_{ANTO} & \text{lämpöpumpun antoteho} \\ \overline{LP_{OTTO}} & \text{lämpöpumpun ottotehon keskiarvo} \end{array}$$

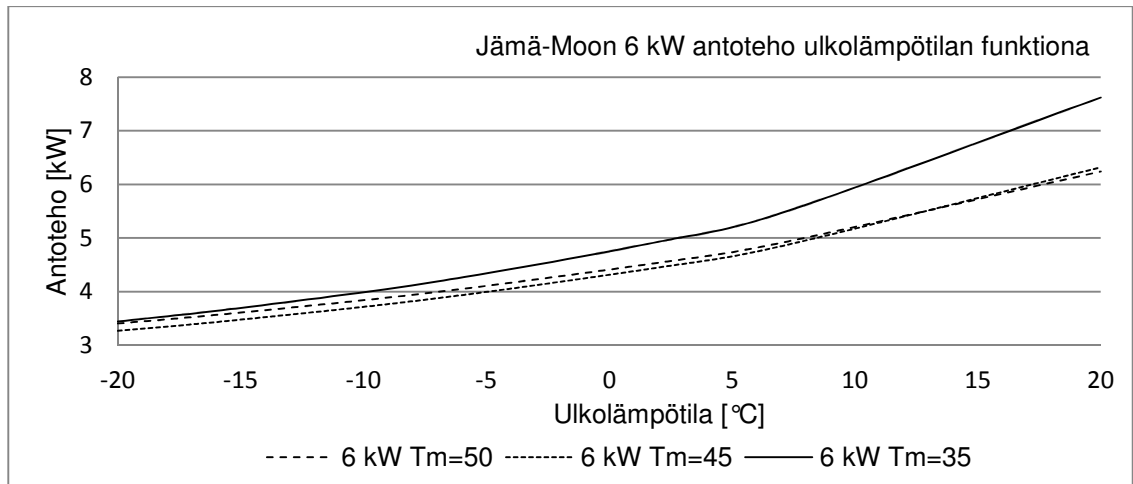
Lämpöpumppujen ottoteho standardimitatuissa pisteissä saadaan lämpöpumppujen tuotetiedoista (liite 1). Ilma-vesilämpöpumppujen laskennassa käytetään lämpöpumppujen ottotehon keskiarvolukemaa kussakin menoveden lämpötilassa. Tuotetiedoista puuttuu standardimittaustulokset käyttövedelle. Käyttöveden tuotossa ottoteho on asetettavissa lähtötietotaulukkoon. Tässä laskennassa käyttövesilämmityksessä lämpöpumppujen ottoteho on 3 kW lämpöpumppumallista riippumatta.

Laskennassa käytetyt ottotehoarvot ilma-vesilämpöpumpuille on esitetty taulukossa 4.11. Maalämpöpumppujen tuotetiedoissa on ilmoitettu antoteho ja lämpökerroin 0 °C lämmönkeruupiirin paluulämpötilalla sekä menoveden lämpötiloilla 35 °C ja 45 °C. Maalämpöpumppujen COP-kerroin ja antoteho on ratkaistu annettujen tietojen avulla. Ottoteho on lämpöpumpun antotehon ja lämpökertoimen suhde. Maalämpöpumpun antoteho ja lämpökerroin menoveden lämpötilalle 50 °C on ratkaistu regressiosuoran avulla. Laskennassa käytetyt ottotehoarvot maalämpöpumpuille on myös esitetty taulukossa 4.11.

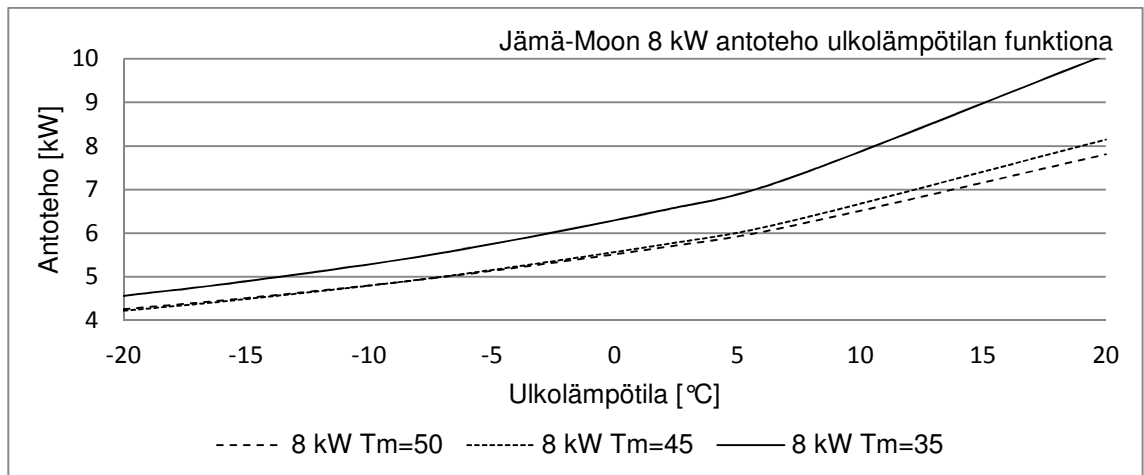
Taulukko 4.11. Jämä-Moon ja Jämä Star lämpöpumppujen ottotehot kolmella menoveden lämpötilalla.

Jämä-Moon lämpöpumppu	Menoveden lämpötila, T _m [°C]	Ottoteho [kW]
6 kW	50	2,10
6 kW	45	1,80
6 kW	35	1,55
8 kW	50	2,58
8 kW	45	2,43
8 kW	35	2,10
10 kW	50	3,08
10 kW	45	2,87
10 kW	35	2,60
14 kW	50	4,72
14 kW	45	4,30
14 kW	35	3,85
Jämä Star lämpöpumppu	Menoveden lämpötila, T _m [°C]	Ottoteho [kW]
6 kW	50	1,35
6 kW	45	1,46
6 kW	35	1,53
8 kW	50	1,75
8 kW	45	1,93
8 kW	35	2,07
10 kW	50	2,13
10 kW	45	2,36
10 kW	35	2,51
12 kW	50	2,66
12 kW	45	3,2
12 kW	35	3,6
15 kW	50	3,63
15 kW	45	4,25
15kW	35	4,67
17 kW	50	4,10
17 kW	45	4,68
17 kW	35	5,07

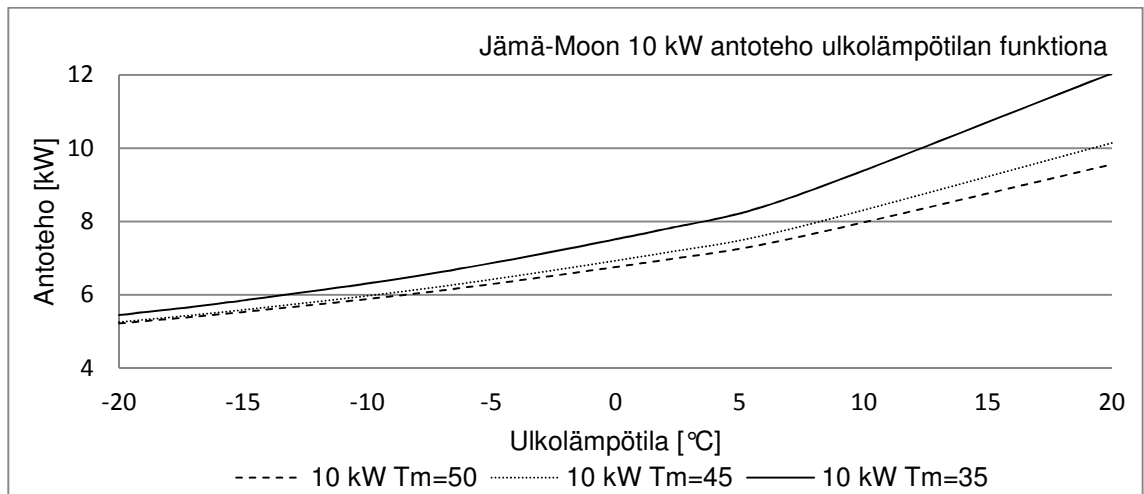
Kuvissa 4.6–4.9 on esitetty Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumppujen laskennassa käytetty antoteho ulkolämpötilan funktiona kolmella eri menoveden lämpötilalla. Antoteholla on suuri merkitys SPF-luvun arvoon sekä SPF-luvun luotettavuuden arvioinnissa, ja tästä syystä lähtötiedon antotehot on esitetty erillisinä kuvaajina kaikille lämpöpumpputyypeille kolmella eri menoveden lämpötilalla.



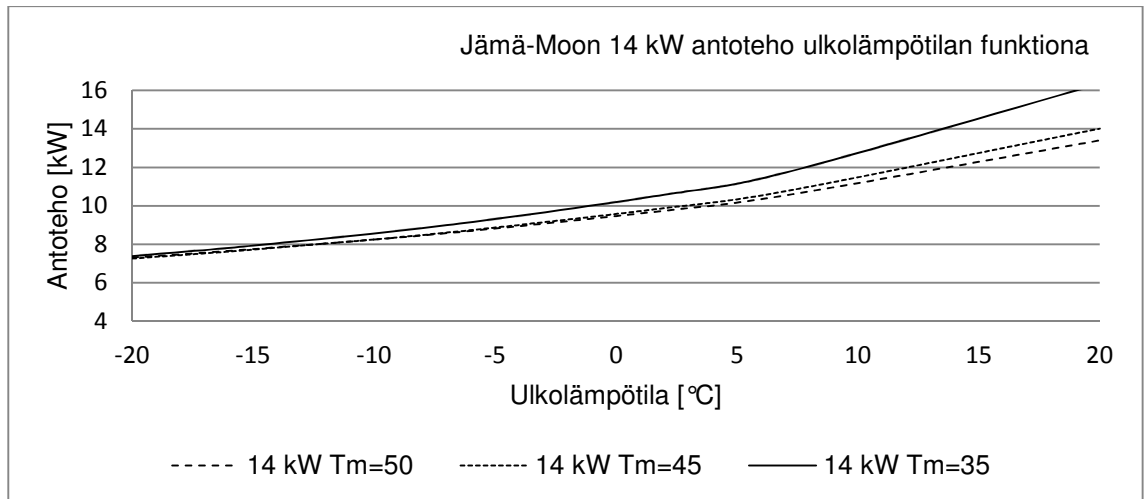
Kuva 4.6. Jämä-Moon 6 kW ilma-vesilämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 4.7. Jämä-Moon 8 kW ilma-vesilämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



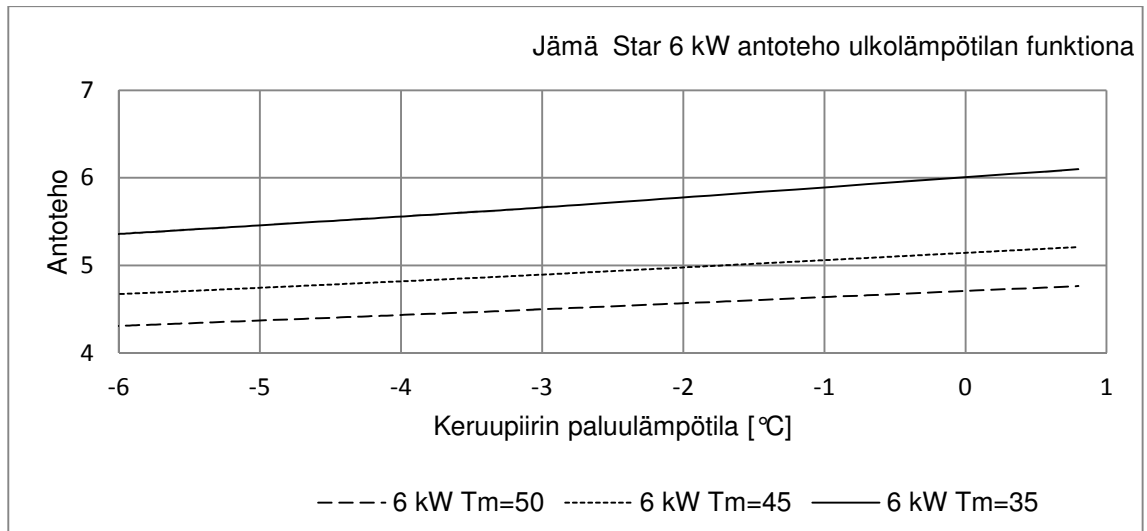
Kuva 4.8. Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



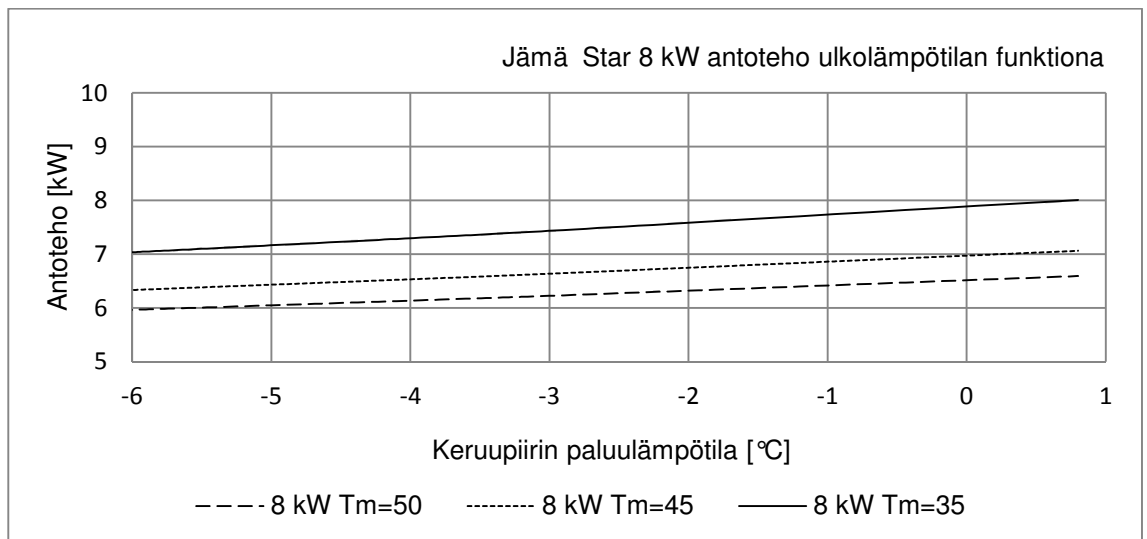
Kuva 4.9. Jämä-Moon 14 kW ilma-vesilämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.

Ilmavesilämpöpumpuissa antoteho lähenee samaa kaikissa menoveden lämpötiloissa – 20 asteen pakkasessa. Ilma-vesilämpöpumppujen toimintaraja on -20 astetta, jonka jälkeen lämpöpumput eivät tuota lämpöenergiaa. Ensimmäisessä lämpötilavälissä (-20 °C) käyntiraja näkyy kaikkien menoveden lämpötilojen osalta antotehon laskuna. Laskuun ei vaikuta lauhdutuslämpötila, sillä toimintaraja toteutuu lauhdutuslämpötilasta riippumatta. Lisäksi lämpöpumpuissa on sulatustoiminta, joka vaikuttaa lämpöpumpun anto- ja ottotehon suhteeseen alentavasti. Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumpuissa sulatuksen käynnistyslämpötilan arvo (höyrystimen lämpötila) on asettavissa välillä 1–5 °C. Tehdasasetus on 1 °C. Sulatuksen pysäytyslämpötilan arvo on asettavissa välillä 10–40 °C. Tehdasasetus on 10 °C. Sulatus pienentää COP-lukua noin 10 %, mikä on otettu huomioon COP-luvun laskennassa.

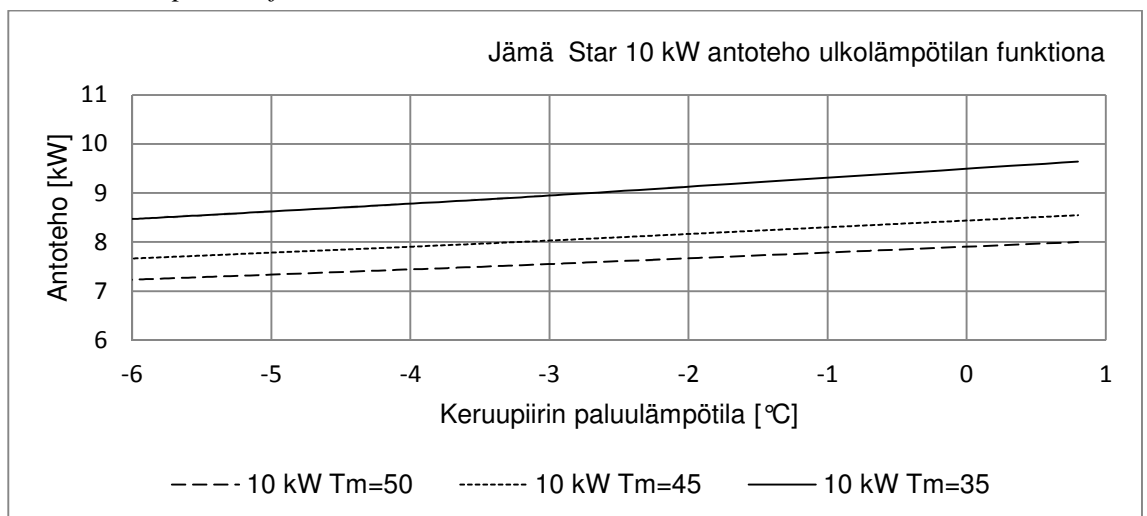
Kuvissa 4.10–4.15 on esitetty Jämä Star maalämpöpumppujen antoteho ulkolämpötilan funktiona. Kuvaajien avulla pystytään huomaamaan keruupiirin lämpötilan vaikutus antotehoon.



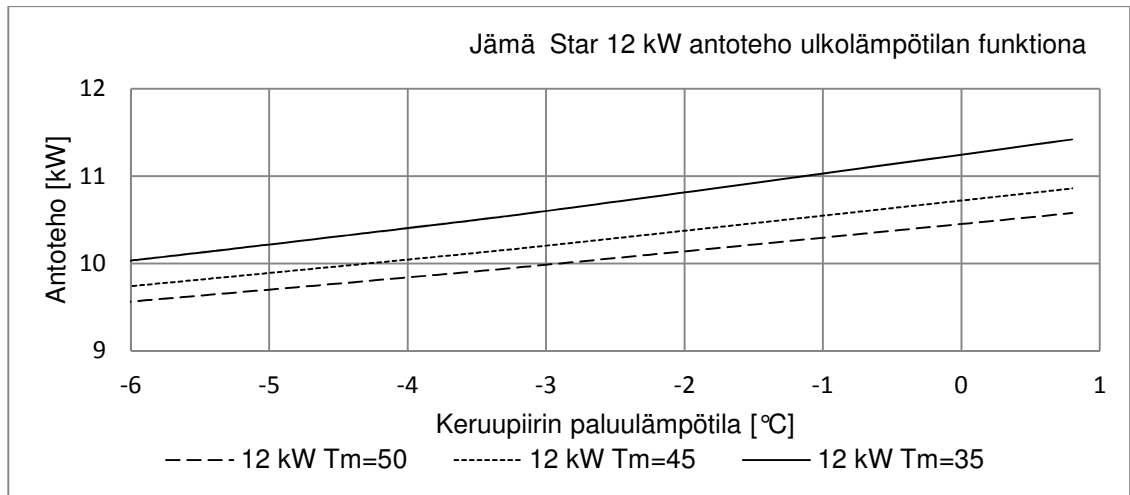
Kuva 4.10. Jämä Star 6 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



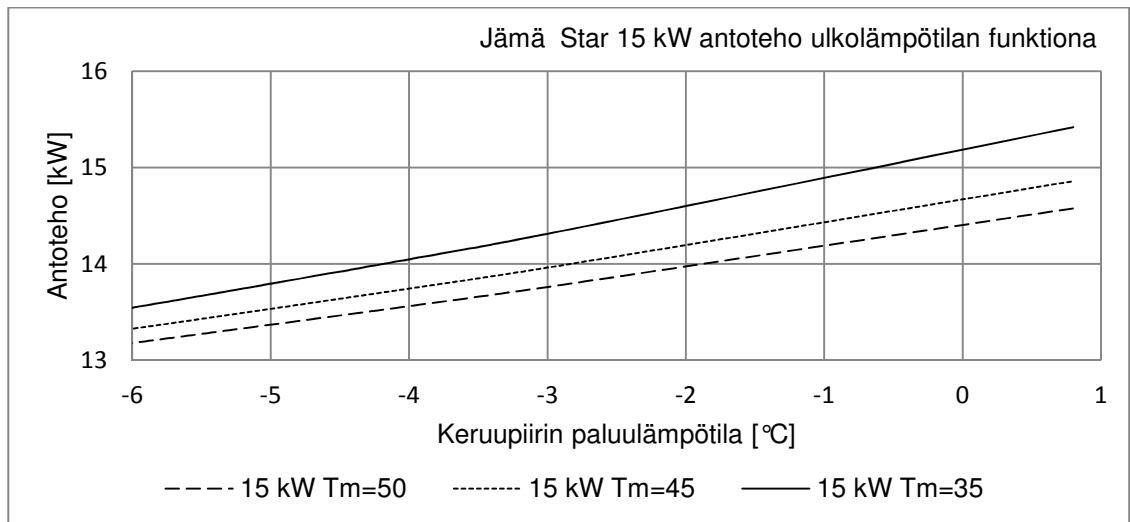
Kuva 4.11. Jämä Star 8 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



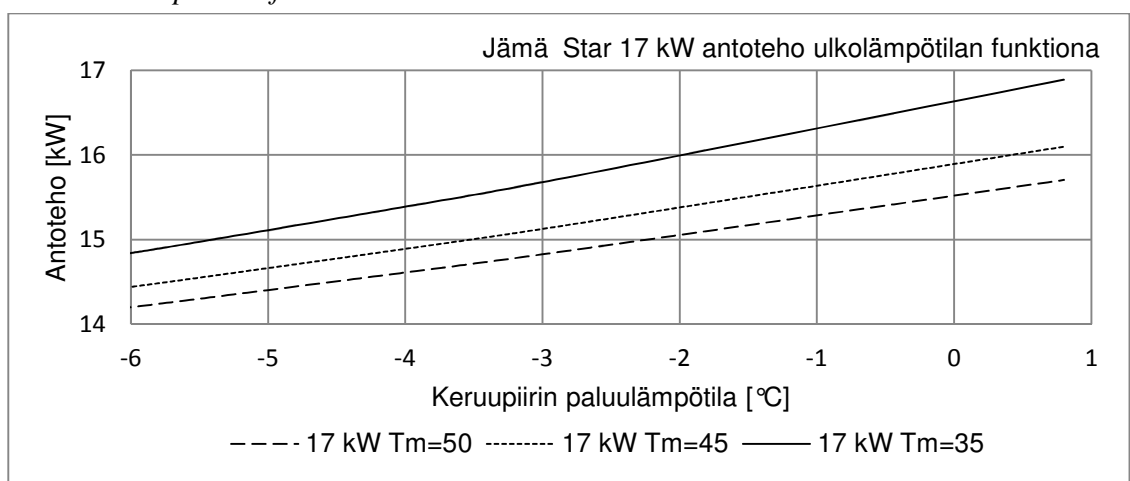
Kuva 4.12. Jämä Star 10 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 4.13. Jämä Star 12 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 4.14. Jämä Star 15 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 4.15. Jämä Star 17 kW maalämpöpumpun antotehot kolmella menoveden lämpötilalla ulkolämpötilan funktiona.

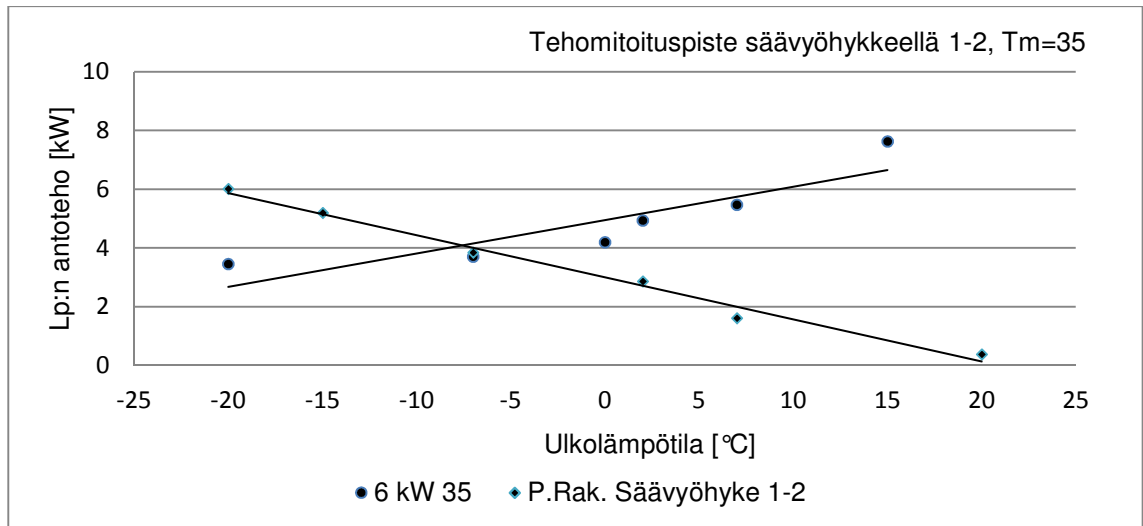
Ilma-vesilämpöpumppujen antoteho -20 asteen pakkasessa on huomattavasti matalampi verrattaessa maalämpöpumppujen antotehoon samassa lämpötilassa. Syynä on keruupiirin korkeampi lämpötila maalämpöpumppujen osalta. Anto- ja ottotehon suhde kuvaa lämpöpumpun hyötysuhdetta tietyissä olosuhteissa. Maalämpöpumpuissa höyrystimen lämpötila on melko korkea myös kovalla pakkasella ja näin ollen antoteho on korkeampi. Maalämpöpumppujen toimintaan ulkolämpötila ei siis vaikuta voimakkaasti, sillä lämmönkeruupiiri on maan alla. Kuten aiemmin olemme todenneet, maaperän pinta-lämpötilaan vaikuttaa ulkolämpötila. Tästä huolimatta maalämpöpumpun höyrystinlämpötila on huomattavasti korkeampi verrattuna ilma-vesilämpöpumpun höyrystinlämpötilaan. Korkeasta höyrystinlämpötilasta johtuen maalämpöpumpuissa ei ole keruupiirin lämpötilaan sidottua toimintarajaa tai sulatusjaksoa. Antoteho kasvaa lineaarisesti keruulämpötilan funktiona kaikissa kolmessa lauhdutuslämpötilassa.

4.2.4 Lämpötilavälien painokertoimet

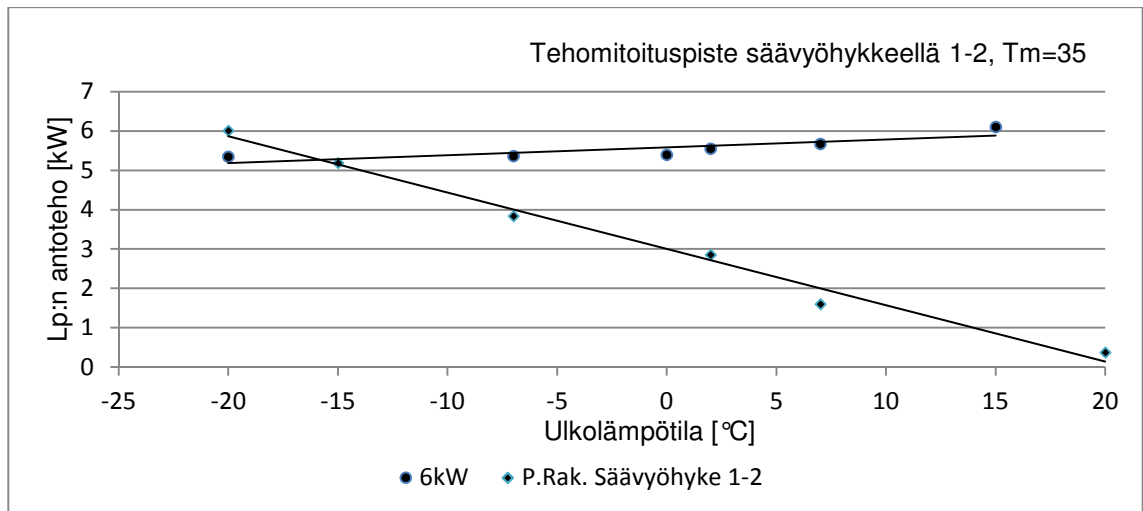
Seuraavassa vaiheessa määritetään lämpötilavälien painokertoimet, vuoden lämmitys- ja käyttövesienergiatarpeen jakautuminen lämpötilaväleille sekä lämpötilavälien aika energiaoppaan mukaisesti. Lämpötilavälin lämmitysenergia on painokertoimen ja vuoden lämmitysenergian tulo. Käyttöveden lämmitysenergia on puolestaan painokertoimen ja vuoden käyttövesilämmitysenergian tulo. Lämpötilavälin aika on ylä- ja alarajan kumulatiivisten tuntikertymien erotus.

4.2.5 Tehomitoituspiste

Ennen lisälämmitysenergian tarpeen laskemista tulee määrittää mihin ulkolämpötilaan asti lämpöpumpulla pystytään tuottamaan koko rakennuksen tarvitsema lämmitysenergia. Tehomitoituspiste kuvaa ulkolämpötilaa, jossa rakennuksen tarvitsema lämpöteho sekä lämpöpumpun antoteho ovat yhtä suuret. Kyseessä on lämpöpumpun antotehoa sekä rakennuksen lämmitystehon tarvetta ulkolämpötilan funktiona kuvaavien suorien leikkauspiste. Kuvassa 4.16 on esitetty 6 kW:n lämpöpumpun tehomitoituspiste menovedellä 35 °C kokonaisenergian tarpeen ollessa 20 000 kWh. Kuvassa 4.17 on esitetty maalämpöpumpun kuvaaja samoilla lähtötiedoilla.



Kuva 4.16. Jämä-Moon 6 kW ilma-vesilämpöpumpun tehomitoituspiste menovedellä 35 °C ja kokonaisenergialla 20 000 kWh.



Kuva 4.17. Jämä Star 6 kW maalämpöpumpun tehomitoituspiste menovedellä 35 °C ja kokonaisenergialla 20 000 kWh.

Kuvista 4.16 ja 4.17 nähdään, että maalämpöpumpulla pystytään kattamaan rakennuksen lämmitysenergian tarve mitoituspakkaselle asti. Mitoituspakkasella tarkoitetaan alueen laskennassa käytettyä alinta pakkaslukemaa. Tehomitoituspisteen alapuolella tarvitaan lämpöpumpusta riippumatta lisäenergiaa kuten sähköä. Lämpöpumppujen antotehoa ulkolämpötilan funktiona esittävät regressiosuorat pysyvät vakiona rakennuksen energiantarpeen muuttuessa.

Rakennuksen lämpöteho eri ulkolämpötiloilla on eri kaikilla säävyöhykkeillä ja muuttuu vuoden lämmitysenergian muuttuessa. Lämpötilavälin lämpöteho on lämmitysenergian suhde kumulatiiviseen tuntikertymään kussakin lämpötilavälissä. Rakennuksen lämpötehoa ulkolämpötilan funktiona esittävä regressiosuora on laskettu siten, että se päivittyy lämmitysenergian muuttuessa. Lämpötilavälien toimintalämpötilat ovat x-arvoja ja

säävyöhykkeiden lämpötilavälien 1-2, 3 ja 4 lämmitystekhot ovat y-arvoja. Regressiosuorat on ratkaistu matemaattisten kaavojen (4.8)– (4.12) avulla.

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (4.8)$$

$$\bar{y}(1-2,3,4) = \frac{\sum y}{n} \quad (4.9)$$

$$b(1-2,3,4) = \frac{\sum xy - n\bar{x}\bar{y}}{\sum x^2 - n\bar{x}^2} \quad (4.10)$$

$$a(1-2,3,4) = \bar{y} - b\bar{x} \quad (4.11)$$

Kunkin lämpöpumpun tehomitoituspiste kussakin säävyöhykkeessä kolmella menoveden lämpötilalla on lämpöpumpun regressiosuoran ja rakennuksen lämpötehontarpeen regressiosuoran leikkauspiste, joka saadaan johdettua muotoon, kaava (4.12).

$$x = \frac{a(\text{rakennus}) - a(Lp)}{b(Lp) - b(\text{rakennus})} \quad (4.12)$$

jossa

x on tehomitoituspiste

$a(\text{rakennus})$ on rakennuksen regressiosuoran vakiotekijä

$a(Lp)$ on lämpöpumpun regressiosuoran vakiotekijä

$b(\text{rakennus})$ on rakennuksen regressiosuoran regressiokerroin

$b(Lp)$ on lämpöpumpun regressiosuoran regressiokerroin

SPF-luvun energialaskentaoppaassa COP-luvun korjaus tehdään vaiheessa 4. Tässä työssä korjauslaskenta sisällytettiin vaiheeseen 1. Laskentavaiheessa 5 määritetään lämpöpumpputyypin. Vaihe 6 liittyy osatehosäätöisen lämpöpumpun toimintaan (invertteri-säätö). Kaikki Jämä-Moon lämpöpumput ovat on/off malleja ja vaihe 6 voidaan jättää laskennassa huomiotta.

4.2.6 Lisälämmitysenergia

Laskennassa tulee määrittää lämpötilavälien lisälämmitysenergian tarve. Lisälämmitysenergiaa tarvitaan, kun lämpöpumppu ei pysty tuottamaan kaikkea tarvittua lämmitysenergiaa. Ilma-vesilämpöpumpuissa lisälämmitystarve on tehomitoituspisteen alapuolisissa lämpötiloissa ja lämpöpumpun toimintarajan (-20 °C) alapuolella. Maalämpöpumpuissa lisälämmitysenergia on puolestaan vain tehomitoituspisteen alapuolisissa lämpötiloissa. Maalämpöpumpuille ei ole määritetty toimintarajaa ulkolämpötilan mukaan. Lisälämmitysenergian tarve ratkaistaan lisälämmityskertoimen avulla. Lisälämmitysenergia on lisälämmityskertoimen ja energiantarpeen tulo. Lisälämmitysenergiakerroin

lasketaan kullekin lämpötilavälille erikseen omalla laskentakaavalla. Lämpötilavälin lisälämmitysenergian laskenta riippuu tehomitoituspisteen arvosta.

Ilma-vesilämpöpumppujen ja maalämpöpumppujen lisälämmityslaskenta eroavat hie- man toisistaan. Ilmavesilämpöpumpuissa, mikäli tehomitoituspiste sijaitsee alimmassa lämpötilavälissä, käytetään kaavaa (4.13). Tehomitoituspisteen sijaitessa lämpötilavälin sisällä lukuun ottamatta viimeistä lämpötilaväliä lasketaan lisälämmitysenergia kaavalla (4.14). Tehomitoituspisteen lämpötilan alapuolisten lämpötilavälien lisälämmitysener- gia ratkaistaan kaavan (4.15) avulla.

$$k = \frac{DH_{tpiste} - (T_s - T_{tpiste})(N_{tpiste} - N_{traja})}{DH_{yr}} \quad (4.13)$$

jossa

k	on lisälämmitysenergiakerroin
DH_{tpiste}	on tehomitoituspisteen kumulatiivinen astetuntikertymä
T_s	on sisälämpötila
T_{tpiste}	on tehomitoituspisteen lämpötila
N_{tpiste}	on tehomitoituspisteen kumulatiivinen tuntikertymä
N_{traja}	on lämpöpumpun toimintarajalämpötilan kumulatiivinen tuntikertymä
DH_{yr}	on lämpötilavälin ylärajalämpötilan kumulatiivinen astetuntikertymä

$$k = \frac{(DH_{tpiste} - DH_{ar}) - (T_s - T_{tpiste})(N_{tpiste} - N_{ar})}{DH_{yr} - DH_{ar}} \quad (4.14)$$

$$k = \frac{(DH_{yr} - DH_{ar}) - (T_s - T_{tpiste})(N_{yr} - N_{ar})}{DH_{yr} - DH_{ar}} \quad (4.15)$$

jossa

DH_{ar}	on lämpötilavälin alarajalämpötilan kumulatiivinen astetuntikertymä
N_{yr}	on lämpötilavälin ylärajalämpötilan kumulatiivinen tuntikertymä
N_{ar}	on lämpötilavälin alarajan kumulatiivinen tuntikertymä

Maalämpöpumpuissa tehomitoituspisteen sijaitessa alimmassa lämpötilavälissä, käyte- tään kaavaa (4.16). Tehomitoituspisteen sijaitessa lämpötilavälissä ratkaistaan lämpöti- lavälin lisälämmitysenergia kaavalla (4.17). Tehomitoituspisteen lämpötilan alapuolis- ten lämpötilavälien lisälämmitysenergia ratkaistaan kaavan (4.18) avulla.

$$k = \frac{DH_{tpiste} - (T_s - T_{tpiste})N_{tpiste}}{DH_{yr}} \quad (4.16)$$

$$k = \frac{(DH_{tpiste} - DH_{yr}) - (T_s - T_{tpiste})(N_{tpiste} - N_{yr})}{DH_{yr} - DH_{ar}} \quad (4.17)$$

$$k = \frac{(DH_{yr} - DH_{ar}) - (T_s - T_{tpiste})(N_{yr} - N_{ar})}{DH_{yr} - DH_{ar}} \quad (4.18)$$

4.2.7 Käyntiaika ja täydentävä lisälämmitysenergia

Käyntiaika määritetään energiaoppaan mukaisesti. Täydentävää lisälämmitystä tarvitaan, mikäli lämpöpumpun tuottama energia ja lisäenergia eivät pysty kattamaan rakennuksen energiantarvetta. Lisälämmitysenergian laskennassa ei otettu huomioon lämmönlähteen viilenemisestä aiheutuvaa antotehon laskua. Antotehon lasku on otettu huomioon lähtötiedoissa ratkaistuissa lämpökertoimissa. Lisälämmityslaskennassa ei kuitenkaan käytetty lämpötilakorjattuja lämpökertoimia, joissa antotehon käyttäytyminen lämmönkeruupiirin lämpötilasta riippuen on otettu huomioon. Täydentävän lisälämmitysenergian tarve määritetään lämpöpumpun käyntiajan avulla. Mikäli lämpöpumpun käyntiaika on pidempi kuin lämpötilavälin pituus, tarvitaan täydentävää lisälämmitystä. Täydentävä lisälämmitys ratkaistaan energiaoppaan mukaan.

4.2.8 Lämpöpumpun anto- ja ottoenergia sekä SPF-luku

Järjestelmän lämmönjaon kiertovesipumpun sähkönkulutus otetaan huomioon E-luvun laskennassa. Lämmönkeruupiirin pumpun sähkönkulutus on puolestaan otettu huomioon lähtötiedon lämpökertoimissa, sillä tuotetietojen tehotiedot on mitattu standardin EN 14511 mukaan. Lämpöpumpun tuottama energia ratkaistaan vuoden kokonaisenergiantarpeen ja kokonaislisälämmitysenergian avulla. Lämpöpumppujen SPF-luvut ratkaistaan kolmella menoveden lämpötilalla kolmessa säävyöhykkeessä tiloille kaavalla 4.19 ja käyttövedelle kaavalla 4.20 erikseen. Laskettuja lukuja tarkastellaan kohdassa SPF-lukujen tarkastelu.

$$SPF_{tilat} = \frac{Q_{tilat}}{E_{tilat} + E_{lisälämmitys(tilat)}} \quad (4.19)$$

jossa

SPF_{tilat} on lämpöpumpun vuosihyötysuhde tiloille

E_{tilat} on lämpöpumpun sähköenergian kulutus tilojen lämmityksessä

$E_{lisälämmitys(tilat)}$ on lisälämmitysenergian tarve tiloille

$$SPF_{kv} = \frac{Q_{kv}}{E_{kv} + E_{lisälämmitys(kv)}} \quad (4.20)$$

jossa

SPF_{kv} on lämpöpumpun vuosihyötysuhde käyttövedelle

E_{kv} on lämpöpumpun sähköenergian kulutus käyttöveden lämmityksessä

$E_{lisälämmitys(kv)}$ on lisälämmitysenergian tarve käyttövedelle [kWh]

5 SPF-LUKUJEN TARKASTELU

Edellä on selvitetty lämpöpumppujen SPF-lukujen yksityiskohtaisen laskentamenetelmän sovellusmalli. Tässä luvussa sovellusmallilla laskettuja lukuja vertaillaan rakentamismääräyskokoelman laskentaohjeessa D5 esitettyihin SPF-lukuihin ja Niben lämpöpumppujen mitoitusohjelman Nibe VPDIM 2.5 SPF-lukuihin. Vertailu tehdään sekä ilma-vesilämpöpumpuille että maalämpöpumpuille. Tuloksia vertaillaan kahdella kuvaajamallilla. Tulosten tarkastelussa tarkastellaan menoveden lämpötilan vaikutusta SPF-lukuun säävyöhykkeittäin. Lisäksi eri menetelmillä ratkaistuja SPF-lukuja tarkastellaan kussakin säävyöhykkeessä kolmella eri menoveden lämpötilalla. Laskennan lähtötiedot on esitetty erikseen. Tässä tarkastelussa arvioidaan SPF-lukuja vain tilojen lämmityksessä.

Yksityiskohtaisella laskentamenetelmän sovellusmallilla laskettuja lukuja vertaillaan ilma-vesilämpöpumppujen osalta myös kenttämittaustietoihin perustuviin SPF-lukuihin. Kenttämittauksia on tehty Jämä-Moon 8 kW ja Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpuilla. Tietoja on kerätty kahdesta kenttämittaustilasta yhden vuoden aikajaksolta. Kohteita kutsutaan tässä työssä kirjaimilla A ja B. Kohteet A ja B on esitelty erikseen. Tulokset on esitetty luvussa mittaustulokset.

5.1 Ilma-vesilämpöpumput

Tässä luvussa esitetään Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF-lukujen vertailu rakennuksen lämmitysenergiakulutuksen ollessa 20 000 kWh. Yksityiskohtaisella laskentamenetelmän sovellusmallilla laskettujen arvojen lähtötiedot on esitetty taulukossa 5.1. Yksityiskohtaisella laskentamallilla laskettuja arvoja kutsutaan kuvissa ja taulukoissa nimellä SPF tilat (S-malli).

Taulukko 5.1. SPF tilat (S-malli) laskennan lähtöarvot yksityiskohtaisella laskentasovellusmallilla.

Lämmitysenergiankulutus	20000 kWh
Käyttövesi	0 kWh
Lämpöpumpun ylärajälämpötila	60 °C
Lämpöpumpun alarajälämpötila	- 20 °C

Nibe VPDIM 2.5 ohjelmalla laskettujen arvojen lähtötiedot on esitetty taulukossa 5.2. Kuvissa ja tulosten analysoinnissa luvuista käytetään nimitystä SPF tilat (NIBE).

Taulukko 5.2. SPF tilat (NIBE) laskennan lähtöarvot Nibe VPDIIM 2.5 laskentaohjelmalla.

Säävyöhyke	1-2	3	4
Vuoden keskilämpötila [°C]	5,57	3,43	0,05
DUT [°C]	- 22	- 29	- 35

Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 SPF-luvut on ratkaistu annetuista arvoista interpoloimalla. Luvut on esitetty taulukossa 5.3. Tulosten analysoinnissa luvuista käytetään nimitystä SPF tilat (D5). Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 SPF-luvut pysyvät vakiona rakennuksen lämmitysenergian kulutuksesta riippumatta.

Taulukko 5.3. Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 SPF tilat (D5) luvut.

T_m [°C]	35	45	50
SPF (1-2)	2,65	2,45	2,35
SPF (3)	2,66	2,43	2,31
SPF (4)	2,56	2,33	2,21

Yksityiskohtaisella laskentamenetelmän sovellusmallilla lasketut arvot on esitetty taulukossa 5.4. Kaikkien ilma-vesilämpöpumppujen SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) kokonaisenergialla 20 000 kWh on esitetty liitteessä 2.

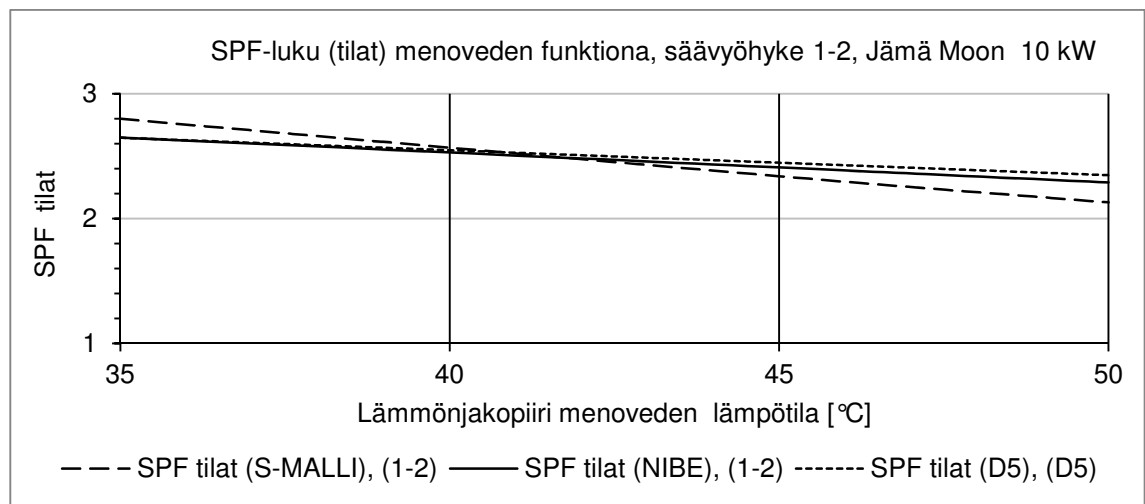
Taulukko 5.4. Yksityiskohtaisella laskentamenetelmän sovellusmallilla ja Nibe laskentaohjelmalla ratkaistut Jämä-Moon 10 kW SPF-luvut (tilat) kokonaisenergian ollessa 20 000 kWh.

T_m [°C]	35		45		50	
	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (Nibe.)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)
SPF (1-2)	2,80	2,65	2,34	2,41	2,13	2,29
SPF (3)	2,67	2,35	2,25	2,16	2,60	2,08
SPF (4)	2,43	2,08	2,09	1,95	1,91	1,88

Kuvissa 5.1-5.3 on esitetty Jämä-Moon 10 kW SPF-luvut (tilat) lämmityspiirin menoveden funktiona kolmella eri laskentaperusteella. Kuvaajat osoittavat SPF-lukujen (tilat) käyttäytymisen eri menoveden lämpötiloilla kolmella eri säävyöhykkeellä eri laskentaperusteilla.

Kuvassa 5.1 on esitetty vertailtavat SPF-luvut kolmella eri menoveden lämpötilalla säävyöhykkeellä 1-2. Yksinkertaisella laskentamenetelmällä lasketut arvot (S-malli) ovat muihin verrattaessa korkeimmat menoveden lämpötilalla 35 astetta. S-mallin ja Niben suorat leikkaavat noin 43 asteen menoveden lämpötilassa. Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 arvot ovat lähes samat Niben laskentaohjelman arvojen kanssa.

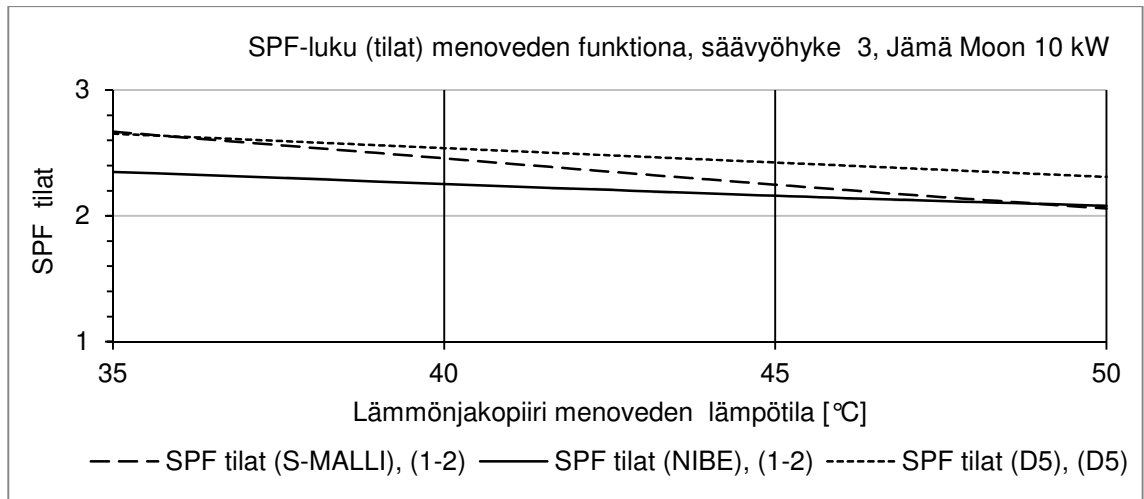
Liitteissä 4-7 on esitetty Jämä-Moon 6 kW, 8 kW ja 14 kW SPF-luvut menoveden funktiona kolmella säävyöhykkeellä rakennuksen lämmitysenergialla 20 000 kWh. Tuloksista voidaan havaita, että Niben laskentaohjelman SPF-luvut ovat lähes kaikilla menoveden lämpötiloilla alhaisimmat kaikissa teholuokissa 14 kW:n teholuokkaa lukuun ottamatta.



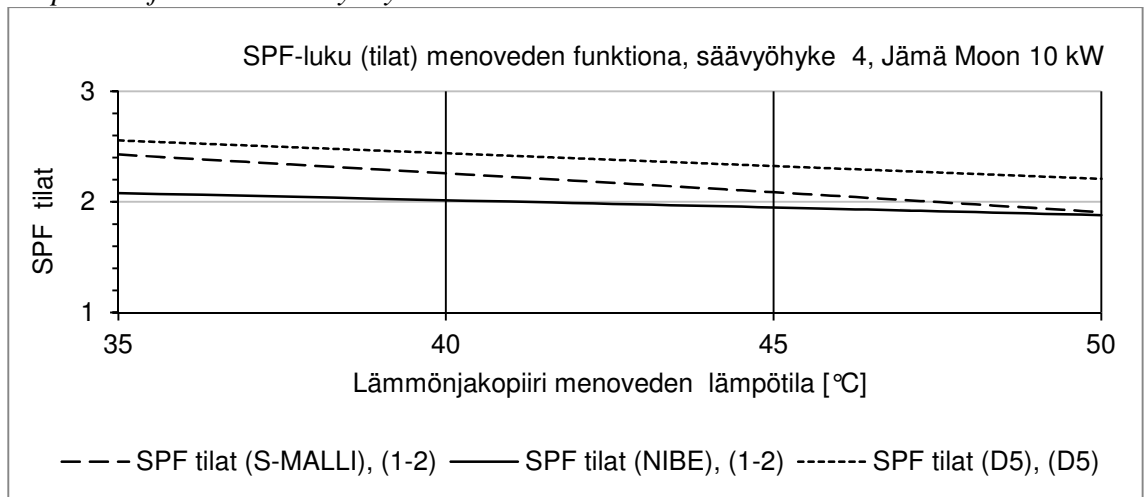
Kuva 5.1. Jämä-Moon 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

Kuvissa 5.2 ja 5.3 on esitetty vertailtavat SPF-luvut kolmella eri menoveden lämpötilalla säävyöhykkeillä 3 ja 4. Yksityiskohtaisella laskentamenetelmällä lasketut SPF-luvut (S-malli) ovat kaikissa menoveden lämpötiloissa korkeammat kuin Niben laskentaohjelmalla lasketut lukemat. Menoveden lämpötilalla 50 astetta, lukemat ovat lähes samat. Menoveden ylittäessä 38 astetta Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 lukemat ovat korkeimmat.

Liitteessä 6 on esitetty Jämä-Moon 14 kW SPF-luvut rakennuksen energiankulutuksella 20 000 kWh. Kuvaajista nähdään, että tilanne on kuviin 5.2 ja 5.3 verrattuna päinvastainen. Liitteen 6 kuvista nähdään, että Niben laskentaohjelmalla saadut arvot ovat kaikissa menoveden lämpötiloissa korkeimmat kaikissa säävyöhykkeissä.



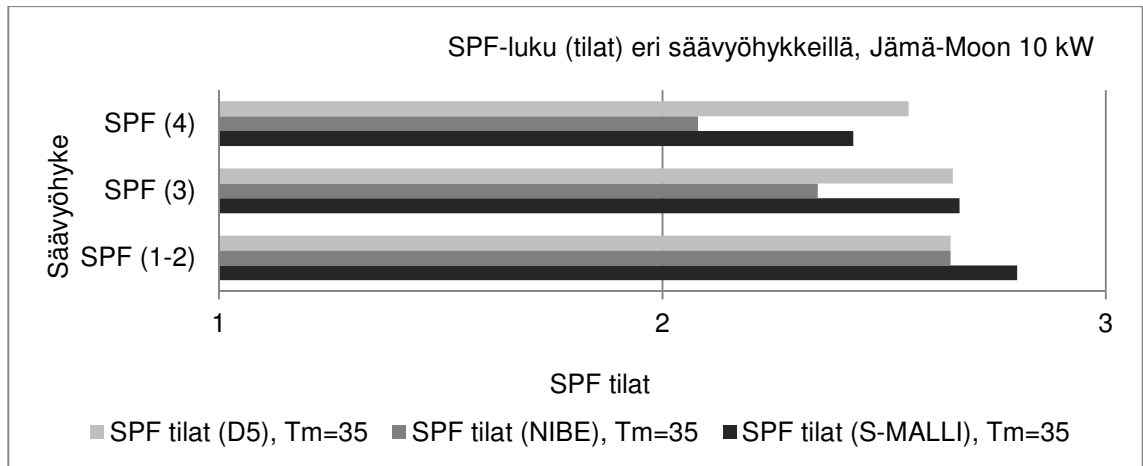
Kuva 5.2. Jämä-Moon 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.



Kuva 5.3. Jämä-Moon 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

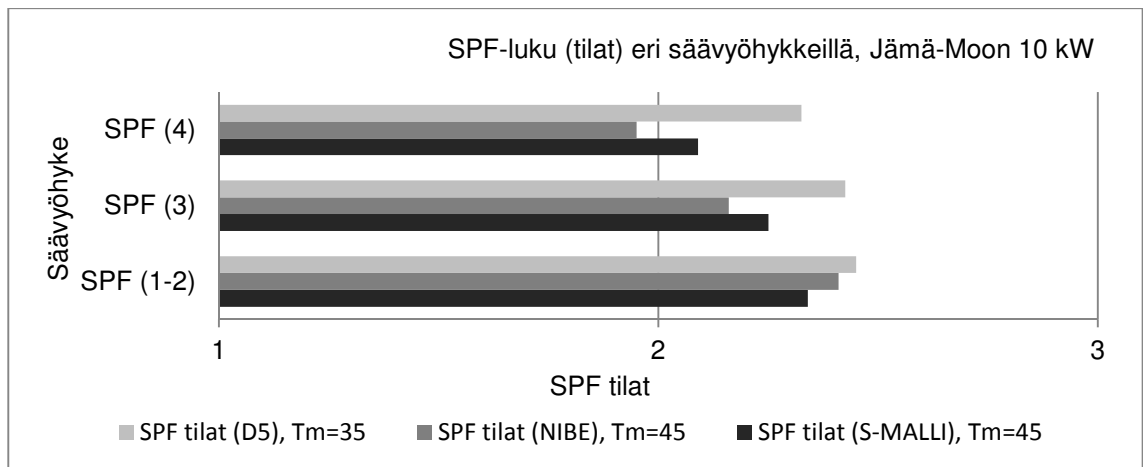
SPF-lukujen määrittämismenetelmät antavat poikkeavia tuloksia. Yhteenvetona voidaan kuitenkin todeta, että lukujen erot ovat 0,1-0,8. Ratkaisumenetelmien SPF-lukujen ero pienenee 10 kW:n pumppumallissa hyvin vähäiseksi.

Kuvissa 5.4–5.6 on esitetty Jämä-Moon 10 kW SPF (tilat) lukemat kolmella menoveden lämpötilalla kolmessa eri säävyöhykkeessä 1-2, 3 ja 4. Kuvassa 5.4 on esitetty Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF-luvut (tilat) kolmella eri säävyöhykkeellä menoveden lämpötilalla 35 astetta. Kuvasta nähdään, että SPF tilat (NIBE) on alhaisin kaikissa säävyöhykkeissä. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero säävyöhykkeillä 1-2,3 ja 4 on 0,15, 0,3 ja 0,35.



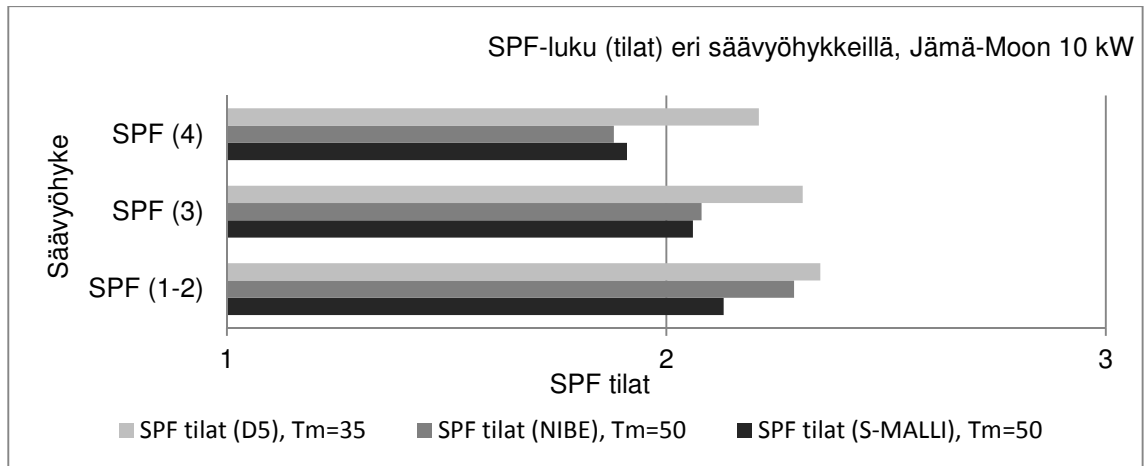
Kuva 5.4. SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 35 °C.

Kuvassa 5.5 on esitetty Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF (tilat) lukemat kolmella eri säävyöhykkeellä 45 asteen menoveden lämpötilalla. SPF tilat (D5) on korkein säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4. Säävyöhykkeellä 1-2 SPF tilat (NIBE), SPF tilat (S-malli) sekä SPF tilat (D5) ovat lähes samansuuruiset. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero säävyöhykkeillä 1-2,3 ja 4 on 0,07 ja 0,09 ja 0,14.



Kuva 5.5. SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 45 °C.

Kuvassa 5.6 on esitetty Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF (tilat) lukemat kolmella eri säävyöhykkeellä 50 asteen menoveden lämpötilalla. Kuvasta nähdään, että SPF tilat (D5) on edelleen korkein kaikissa säävyöhykkeissä. Säävyöhykkeillä 3 ja 4 SPF tilat (NIBE) on lähes samansuuruinen SPF tilat (S-malli) kanssa. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 on 0,16 ja 0,02 ja 0,03.



Kuva 5.6. SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 50 °C.

Tarkastellaan hieman tarkemmin Jämä-Moon 6 kW ilma-vesilämpöpumpun laskennan tuloksia vaihtoehtoisilla ratkaisumenetelmillä käyttäen taulukon 5.2 lähtötietoja. Niben mitoitusohjelmalla Jämä-Moon 6 kW lämpöpumpun tuottama energia on 17 317 kWh ja huipputehontarve on 8,7 kW. Lämpöpumpun käyttämä energia lisälämmitysenergia huomioiden on 8928 kWh. Lämpöpumpun käyntiaika on 3628 h ja lämmityksen vuosihyötysuhde on 2,11 (liite 2). Yksityiskohtaisella laskentasovellusmallilla Jämä-Moon 6 kW lämpöpumpun tuottama energia on 19 098 kWh ja huippuenergiantarve on 6 kW. Lämpöpumpun käyttämä energia lisälämmitysenergia huomioiden on 7169 kWh. Lämpöpumpun käyntiaika on 4138 h ja lämmityksen vuosihyötysuhde on 2,66 (liite 2).

Syitä tulosten poikkeavuuteen ovat huipputehontarpeiden ero, lähtötietojen ero ja laskentaperusta. Niben mitoitusohjelman laskentataustaa ei ole tämän työn yhteydessä selvitetty.

5.2 Maalämpöpumput

Tässä luvussa esitetään Jämä Star 10 kW maalämpöpumpun SPF-lukujen vertailu rakennuksen lämmitysenergiakulutuksen ollessa 20 000 kWh. Yksityiskohtaisella laskentamallilla laskettuja arvoja kutsutaan kuvissa ja taulukoissa nimellä sovellusmalli eli S-malli. Nibe VPDIM 2.5 ohjelmalla laskettujen arvojen lähtötiedot on esitetty taulukossa 5.5 ja lukuja kutustaan nimellä NIBE.

Taulukko 5.5. Maalämpöpumppujen SPF tilat (NIBE) laskennan lähtöarvot.

Lämmitysenergiankulutus	20000–40000 kWh
Käyttövesi	0 kWh
Lämpöpumpun alarajalämpötila	- °C
Keruupiirin paluunesteen keskilämpötila	0,5 °C
Kallion lämmönjohtavuus	3 W/mK
Lämpötilaero höyrystimessä	3 K

Maalämpöpumppujen SPF-luvut on laskettu kolmella eri kokonaisenergialla lämpöpumpun nimellistehosta riippuen. Maalämpöpumppujen SPF-lukujen laskennassa käytetyt kokonaisenergiat on esitetty taulukossa 5.6.

Taulukko 5.6. Maalämpöpumppumallien kokonaisenergia SPF-lukujen laskennassa.

	Mitoitusenergia [kWh]
Jämä Star 6	20000
Jämä Star 8	20000
Jämä Star 10	20000
Jämä Star 12	30000
Jämä Star 15	30000
Jämä Star 17	40000

Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 SPF-luvut on ratkaistu annetuista arvoista interpoloimalla. Luvut on esitetty taulukossa 5.7. Tulosten analysoinnissa luvuista käytetään nimitystä D5. *Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5* SPF-luvut pysyvät vakiona lämmitysenergiasta ja säävyöhykkeestä riippumatta. Vuotuinen keruupiirin paluunesteen keskilämpötila on -3 astetta.

Taulukko 5.7. Rakentamismääräyksen laskentaohjeen SPF tilat (D5) lukemat.

T_m	35	45	50
SPF (1-2)	3,20	2,90	2,75
SPF (3)	3,20	2,90	2,75
SPF (4)	3,20	2,90	2,75

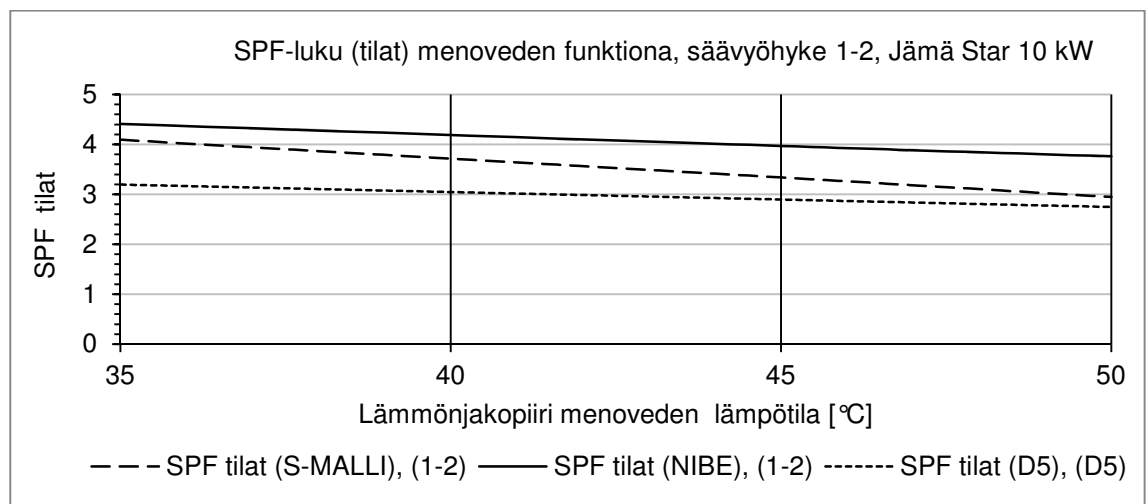
Yksityiskohtaisella laskentamenetelmän sovellusmallilla lasketut arvot on esitetty taulukossa 5.8. Kaikkien maalämpöpumppujen SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) kokonaisenergialla 20 000-40 000 kWh on esitetty liitteissä 3 ja 7-11.

Taulukko 5.8. Yksityiskohtaisella laskentamenetelmällä ratkaistut Jämä Star 10 kW lämpöpumpun SPF-luvut kokonaisenergian ollessa 20 000 kWh.

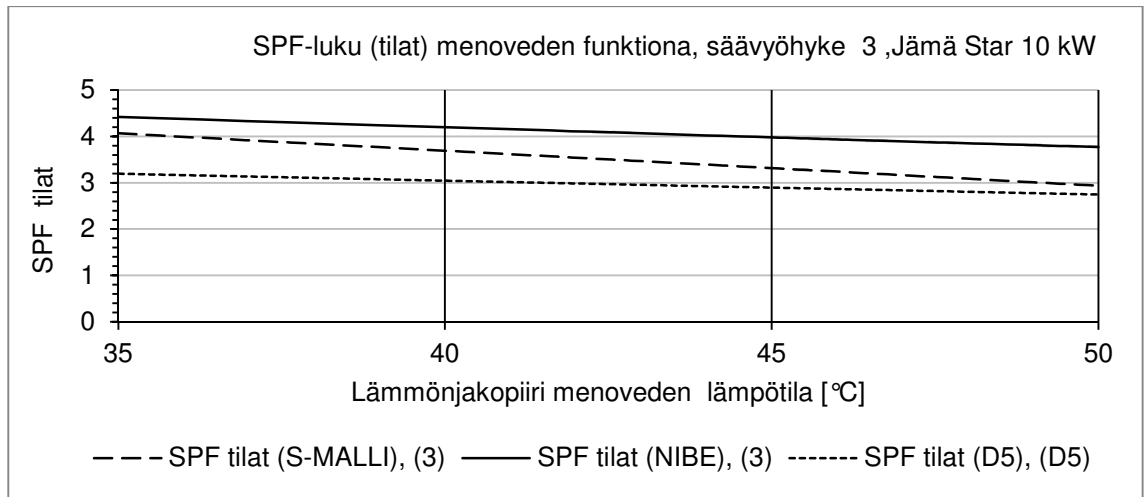
T_m [°C]	35		45		50	
	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (Nibe.)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)
SPF (1-2)	4,09	4,41	3,34	3,97	2,95	3,76
SPF (3)	4,07	4,42	3,32	3,98	2,94	3,77
SPF (4)	4,04	4,45	3,30	4,00	2,92	3,78

Kuvissa 5.7–5.9 on esitetty vertailtavat SPF-luvut kolmella eri menoveden lämpötilalla säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4. Yksinkertaisella laskentamenetelmällä lasketut arvot (S-malli) ovat rakentamismääräyksen $D5$ arvojen (D5) ja Niben laskentaohjelman arvojen (NIBE) puolivälissä. Rakentamismääräyksen laskentaohjeen $D5$ arvot ovat kaikissa mittapisteissä alhaisimmat ja Niben laskentaohjelman arvot puolestaan korkeimmat.

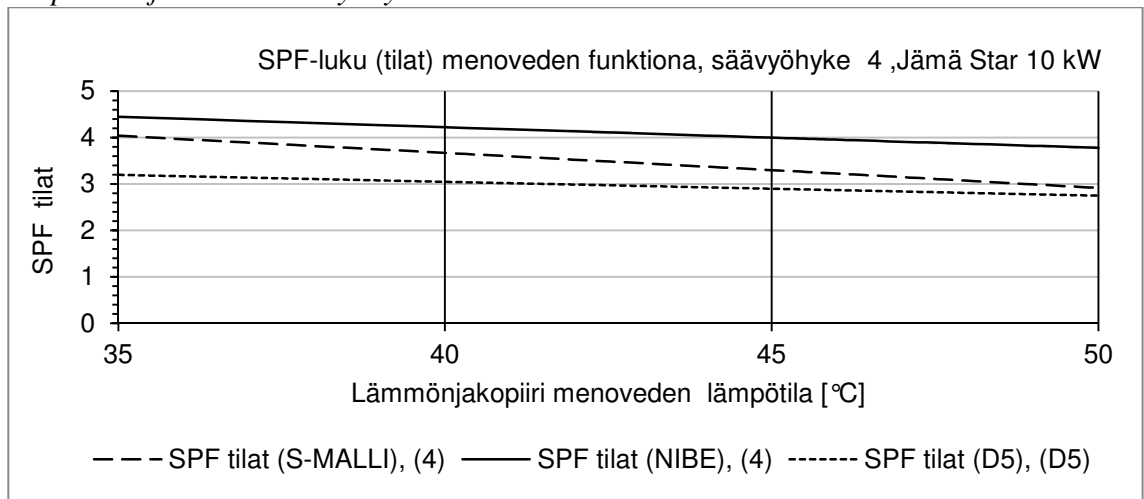
Liitteissä 6-11 on esitetty Jämä Star 6 kW, 8 kW, 12 kW, 15 kW ja 17 kW SPF-luvut menoveden funktiona kolmella säävyöhykkeellä rakennuksen lämmitysenergialla 20 000–40000 kWh. Tuloksista nähdään lukujen samankaltainen käyttäytyminen, kuin tässä kappaleessa esitettyjen lukujen analysoinnissa on havaittu. Poikkeuksena on Jämä Star 17 (liite 11), jossa Niben laskentaohjelman arvot (NIBE) ovat alhaisimmat ja laskentasovellusmallilla lasketut luvut (S-malli) puolestaan korkeimmat.



Kuva 5.7. Jämä Star 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

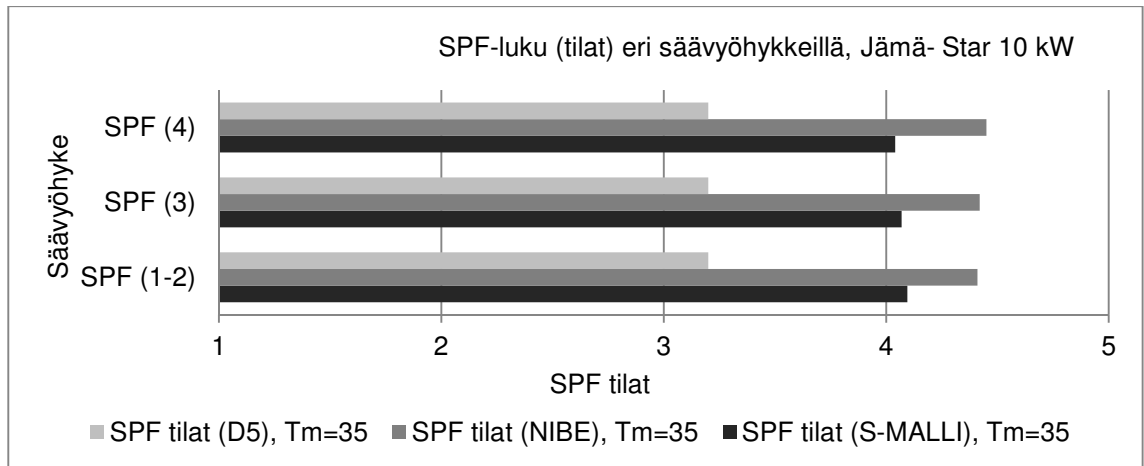


Kuva 5.8. Jämä Star 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.



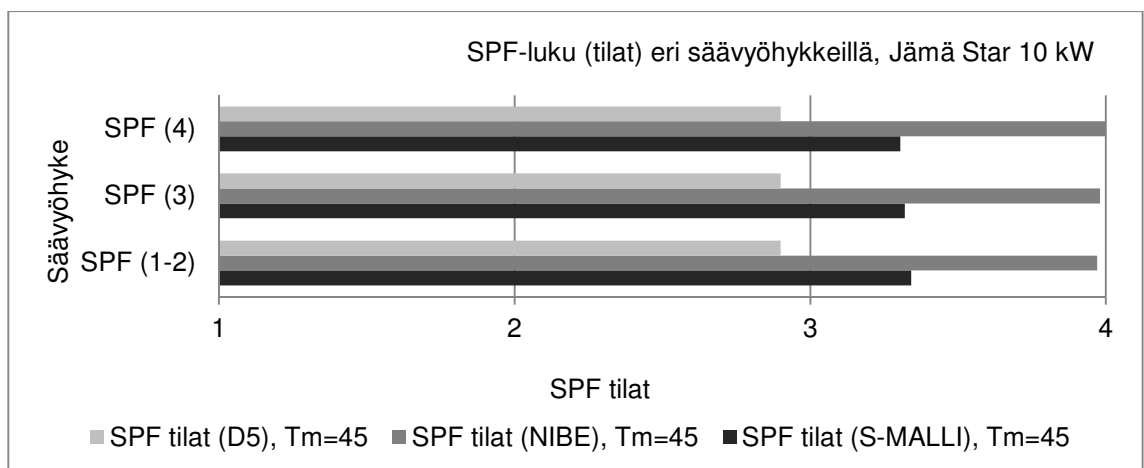
Kuva 5.9. Jämä Star 10 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

Kuvissa 5.10–5.12 on esitetty Jämä Star 10 kW SPF (tilat) lukemat kolmella menoveden lämpötilalla kolmessa eri säävyöhykkeessä 1-2, 3 ja 4. Kuvassa 5.10 on esitetty Jämä Star 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF-luvut (tilat) kolmella eri säävyöhykkeellä menoveden lämpötilalla 35 astetta. Kuvasta nähdään, että SPF tilat (D5) on alhaisin kaikissa säävyöhykkeissä ja SPF tilat (NIBE) on puolestaan korkein. SPF tilat (NIBE) sekä SPF tilat (S-malli) ovat melko lähellä toisiaan. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero on kaikki säävyöhykkeet otettu huomioon 0,32–0,41.



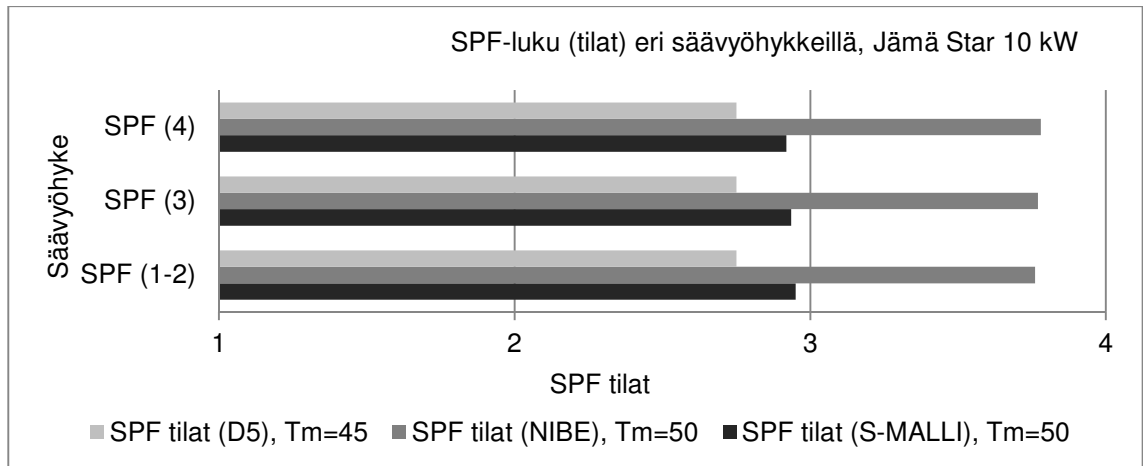
Kuva 5.10. Jämä Star 10 kW SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 35 °C.

Kuvassa 5.11 on esitetty Jämä Star 10 kW maalämpöpumpun SPF (tilat) lukemat kolmella eri säävyöhykkeellä 45 asteen menoveden lämpötilalla. Kuvasta nähdään, että SPF tilat (D5) on jälleen alhaisin ja SPF tilat (NIBE) on puolestaan korkein. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero säävyöhykkeillä on 0,63–0,7.



Kuva 5.11. Jämä Star 10 kW SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 45 °C.

Kuvassa 5.12 on esitetty Jämä Star 10 kW maalämpöpumpun SPF (tilat) lukemat kolmella eri säävyöhykkeellä 50 asteen menoveden lämpötilalla. Kuvasta nähdään, että SPF tilat (D5) on edelleen alhaisin kaikissa säävyöhykkeissä. SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (S-malli) lukujen ero säävyöhykkeillä on 0,8 ja 0,9.



Kuva 5.12. Jämä Star 10 kW SPF (tila)-luvut säävyöhykkeillä 1-2, 3 ja 4 menoveden lämpötilassa (T_m) 50 °C.

Maalämpöpumppujen SPF-luvuissa on melko suuria eroavaisuuksia riippuen määrittämismenetelmästä. Verrattaessa Niben laskentaohjelman avulla laskettuja SPF-lukuja yksityiskohtaisella laskentasovellusmallilla laskettuihin SPF-lukuihin, voidaan havaita lukujen eron kasvu siirryttäessä matalasta lämmönjako lämpötilasta korkeaan.

SPF-lukujen eron kasvun huomaa myös eri säävyöhykkeillä. Lukujen ero kasvaa siirryttäessä 1-2 säävyöhykkeestä 4 säävyöhykkeeseen. Pienin ero määrittämismenetelmien välillä on 0,19 (Jämä Star 6 kW, liite 6).

Tuloksista voidaan havaita, että yksityiskohtaisella laskentasovellusmallilla ratkaistut luvut ovat noin SPF tilat (NIBE) ja SPF tilat (D5) lukujen keskiarvo. Poikkeuksena on Jämä Star 17 kW (liite 10), jossa SPF tilat (NIBE) ovat kaikissa menoveden lämpötiloissa alhaisimmat.

5.3 Mittausarvoihin perustuva SPF-luku

Kaukora Oy on tehnyt kenttämittauksia kahdessa kohteessa A ja B. Kohteiden tiedot on esitetty taulukossa 5.9. Kohteesta A tietoja on kerätty vuosilta 2011–2012 ja kohteesta B puolestaan vuosilta 2013–2014.

Taulukko 5.9. Kaukora Oy:n teettämän kahden Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumpun kenttämittauksen lähtötiedot.

	A	B
Rakennus	2001, 110 m ²	1980-luku, 100 m ²
Lämmitysmuoto	Sähkökattila	Öljykattila
Lämmitysenergian tarve [MWh]	15 (ei sis. kv)	14,5 (1,6 m ³ öljyä/vuosi)
Asennusvuosi	2010	2013
lämpöpumpun nimellisteho [kW]	10,9 (7/35 °C)	8,6 (7/50 °C)
Lämmönjako	lattialämmitys	patteri

Referenssikohteissa on kerätty tiedot kerran viikossa vuoden ajan. Kohteesta A mittaus-tuloksista on ratkaistu SPF-luku (tilat) ja kohteesta B puolestaan SPF-luku (tilat+kv). Mittaustulokset kummastakin kohteesta on esitetty luvussa mittaustulokset.

5.3.1 Ilma-vesilämpöpumppu sähkölämmityksen rinnalle (kohde A)

Referenssikohte A on 2000-luvun alussa rakennettu omakotitalo. Talon lämmitysmuotona on vesikiertoinen sähkölämmitys. Yösähkövaraajana toimii 1,2 m³ Jäspi Ovali varaaja. Talon lämmitettävä pinta-ala on 110 m² ja lämmönjakojärjestelmänä toimii vesikiertoinen lattialämmitys. Taloudessa on erillinen 300 litran yösähköllä toimiva Jäspi-VLM käyttövesivaraaja, jota ei ole kytketty yösähkövaraajaan. Menovettä ohjaa Ouman-säätöyksikkö, joka toteuttaa alhaisinta A-käyrää (35/30 °C). Taulukossa 5.10 on esitetty talon sähkön kulutus vuosilta 2006–2010. Lukemat sisältävät käyttövedenkulutuksen. Vuotuisesti käyttövedenkulutukseksi on arvioitu nelihenkisellä perheellä noin 4000 kWh.

Taulukko 5.10. Referenssikohteen sähkön kulutus vuosilta 2006–2010 (sis. käyttöveden kulutuksen).

Vuosi	2006	2007	2008	2009	2010
Päivä [kWh]	3747	3893	3810	4307	4681
Yö [kWh]	17430	17560	16090	18201	16363
Yht. [kWh]	21177	21453	19900	22508	21044

Ilma-vesi-lämpöpumppu Jämä-Moon 10 kW on asennettu Ovali (1,2 m³) lämminvesivaraajaan. Ovaliin on asennettu käyttöveden esilämmityskierukat, mutta kierukoita ei ole kytketty käyttövesivaraajaan. Ilmavesilämpöpumpun tuottama energia hyödynnetään vain lämmitykseen. Tässä työssä mittausravoihin perustuva SPF-luku on verrattavissa SPF-luku (tilat) lukemaan.

Lämpöpumpun toimintaa ohjaa VT10 varaajatermostaatti (pumpulla X200). Termostaattia ohjaava lämpötila anturi on sijoitettu sähkövaraajan alaosaan. Lämpöpumpun kompressori käy varaajan lämpötilan mukaan toteuttaen käyntidifferenssiä päälle 40 °C ja pois 45 °C. Yö- ja päiväsähkön aktivoimiseen lisälämmöksi käytetään apureleitä HR 10. Lisälämpörele (pumpulla X201 1-3) eli päiväsähkövastus aktivoituu, kun asetettu ulkolämpötila eli 0 °C saavutetaan. Päiväsähkötermostaatti on asetettu 50 °C asteeseen. Lisälämmön aktivoinnin oletetaan olevan tasapainolämpötilassa, jossa lämpöpumpun antoteho ja rakennuksen lämpötehon tarve ovat yhtä suuret. Kun ulkolämpötila edelleen laskee alle seisontalämpötilan (-20 °C), lämmitys tapahtuu seisontareleen (liittimen X201 4-6) kautta. Yösähkövastuksen termostaatti on asetettu 75 °C:een.

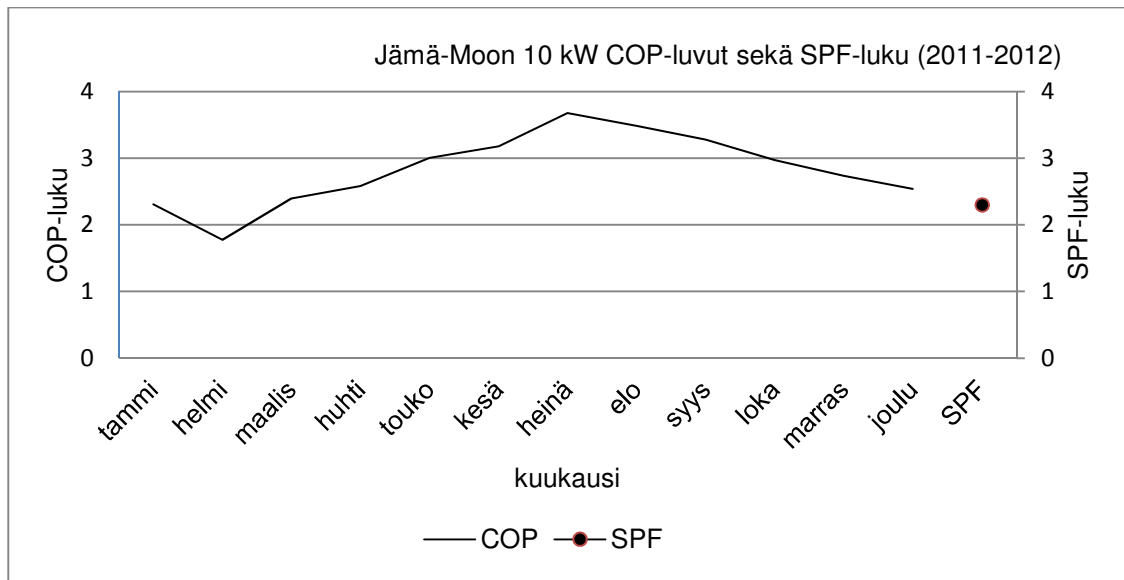
Kohteen energiamittaukseen on käytetty Kamstrupin Multical 601 & Ultraflow energiamittareita. Mittauspisteet ovat lämpöpumpun tulo- ja paluuputkessa (Lp anto), lämmityksen menoputkessa (kulutus) sekä sähkötaulussa mitaten yö- ja päiväsähkövastusten energiamäärän. Energiamittareista on otettu tulos kerran viikossa vuoden ajan.

5.3.2 Ilma-vesilämpöpumppu öljykattilan rinnalle (kohde B)

Referenssikohde B on 1980-luvun alussa rakennettu omakotitalo. Talon lämmitettävä pinta-ala on noin 100 m² ja lämmönjakojärjestelmänä toimii vesikiertoinen patterilämmitys. Talon lämmöntuottojärjestelmänä toimii Jäspi Eco 17 Lux öljykattila. Järjestelmässä on erillinen 100 litran Jäspi-VLK käyttöveden tulistusvaraaja. Öljy toimii talossa lisälämmönlähteenä sähkön rinnalla. Nykyisen öljykattilan vesitilavuus 180 l toimii ilma-vesilämpöpumpun puskurivaraajana. Käyttövesi esilämmitetään öljykattilan käyttövesikierukassa ja tulistetaan erillisessä käyttövesivaraajassa. Kohteessa on mitattu lämpöpumpun tuottama energia, öljyn kulutus sekä lisälämmitykseen ja käyttöveden lämmitykseen kulunut sähköenergia.

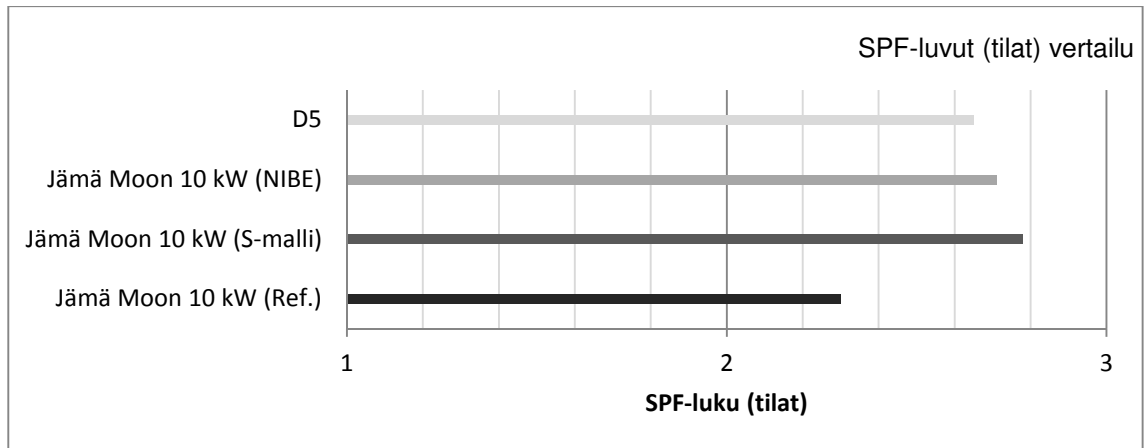
5.3.3 Mittaustulokset kohteesta A ja B

Edellä on todennettu lämmönkeruupiirin lämpötilan ja lämpötilan vaihtelun vaikutus lämpöpumpun antotehoon. Lisäksi on selvitetty lämpöpumpun lämpökertoimen riippuvuus lämpöpumpun antotehoon. Mittaustulokset tukevat teoreettista tarkastelua. Kuvassa 5.13 on esitetty Jämä-Moon 10 kW (kohde A) lämpöpumpun keskiarvolämpökerroinlukema vuoden jokaiselta kuukaudelta. Lämpöpumpun lämpökerroin kasvaa suhteessa lämmönkeruupiirin lämpötilaan. Kesäkuukausina lämpökerroin on 3,8 ja talvikuukausina kerroin on alle 2. Kuvassa 5.13 on esitetty myös referenssikohteen A lämpöpumpun SPF-luku. Mittausvuosina 2011–2012 SPF-luku on ollut 2,3. SPF-luku ei ole vuoden lämpökertoimien keskiarvo. Kyseessä on mittausvuosien lämpöpumpun antotehon suhde ottotehoon lisälämmitysenergian huomioiden. Referenssikohteessa lisälämmitysenergiana toimii sähkö, jonka hyötysuhde on 100 %.



Kuva 5.13. Jämä-Moon 10 kW COP-luvut ja SPF-luku mittaustuloksista 2011–2012.

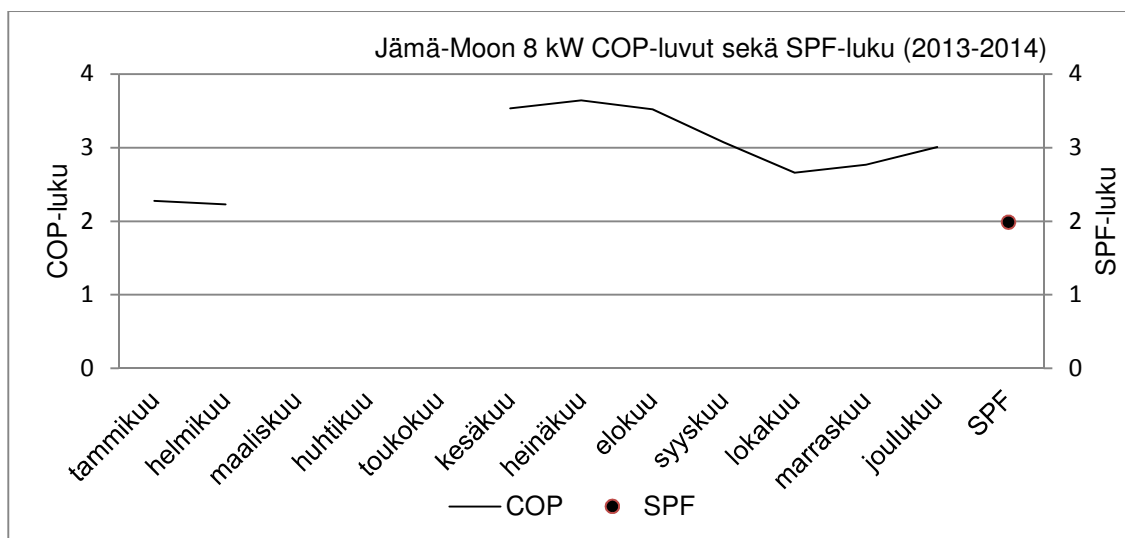
Referenssikohteen A keskiarvoenergiankulutus vuosilta 2001–2010 noin on 22053 kWh. Käyttöveden kulutus on noin 19–22 % rakennuksen kokonaisenergian kulutuksesta. Testivuonna rakennuksen tilojen lämmitykseen kulunut energia on ollut 15080 kWh. Kuvassa 5.14 on esitetty Jämä-Moon 10 kW SPF-luvut kolmella menetelmällä ratkaisutuna. Referenssikohteen A testivuosien 2011–2012 SPF-luku (tilat) on 2,3. Yksinkertaisella laskentamallilla laskettu SPF-luku (tilat) tilojen lämmitysenergialla 15080 kWh on 2,78. Niben laskentaohjelmalla (NIBE) laskettu lukema on 2,71 ja rakentamismääräyskokoelman laskentaohjeessa D5 taulukoitu arvo on 2,65.



Kuva 5.14. Jämä-Moon 10 kW mittaustietoihin perustuva SPF-luku vuodelta 2010–2011.

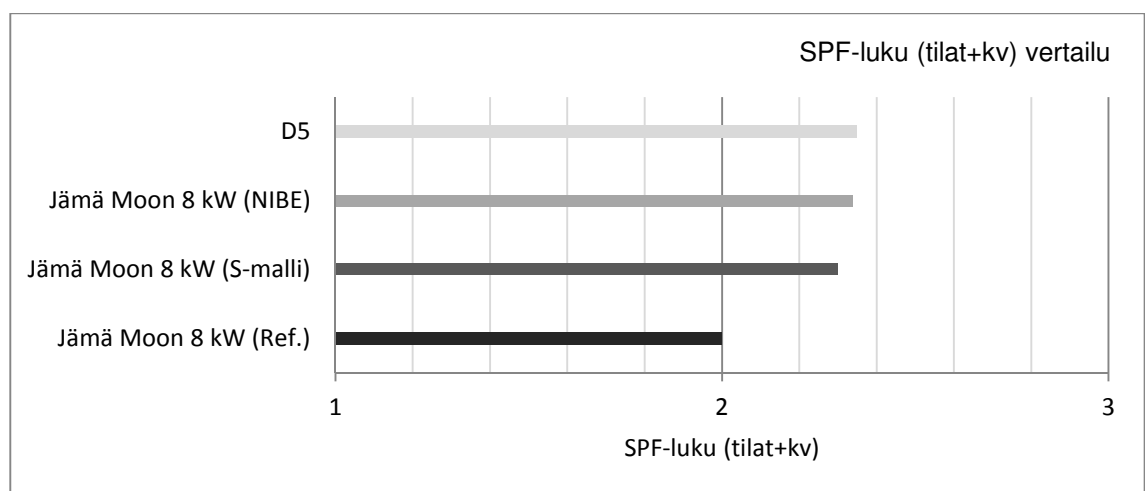
Yksinkertaisella laskentamenetelmällä lasketussa arvossa on oletettu, että lisälämmitys tuotetaan sähköllä ja hyötysuhteena on tällöin 100 %. Yksinkertaisen laskentamallin lisäenergiälaskenta on vertailukelpoinen mittaustietojen kanssa. Eri keinoin ratkaistujen SPF-lukujen keskiarvo on 2,63.

Kuvassa 5.15 on esitetty Jämä-Moon 8 kW lämpöpumpun (kohde B) keskiarvolämpökerroinlukema jokaiselta kuukaudelta maaliskuu-toukokuuta lukuun ottamatta. Lämpöpumpun lämpökerroin kasvaa suhteessa lämmönkeruupiirin lämpötilaan. Kesäkuukausina lämpökerroin on maksimissaan 3,8 ja talvi-kuukausina kerroin on alle 2. Kuvassa 5.15 on esitetty referenssikohteen B lämpöpumpun SPF-luku. Mittausvuonna 2013–2014 SPF-luku on ollut 2. Referenssikohteessa lisälämmitysenergiana toimii öljy ja sähkö. Öljykattilan hyötysuhde on 90 %. SPF-luvussa on otettu huomioon myös käyttöveden tulistussähkö.



Kuva 5.15 Jämä-Moon 8 kW COP-luvut ja SPF-luku mittaustuloksista 2013–2014 kohde B.

Testivuotena referenssikohteen B rakennuksen energiankulutus on ollut noin 14554 kWh sisältäen käyttöveden lämmityksen. Käyttövesi on noin 19 % kokonaisenergian kulutuksesta. Kuvassa 5.16 on esitetty Jämä-Moon 8 kW SPF-luvut kolmella menetelmällä ratkaistuna. Referenssikohteen testivuosien 2013–2014 SPF-luku (tilat+kv) on 2. Lisälämmönlähteenä toimii öljykattila hyötysuhteella 90 % ja sähkö. Yksinkertaisella laskentamallilla laskettu SPF-luku (tilat+kv) tilojen lämmitysenergialla 11789 kWh ja käyttöveden energialla 2765 kWh on 2,33 menoveden lämpötilalla 50 astetta. Niben laskentaohjelmalla (NIBE) laskettu lukema on 2,34 ja rakentamismääräyskokoelman laskentaohjeessa D5 taulukoitu arvo on 2,35. Niben laskentaohjelmalla lasketussa lukemassa öljyn kulutus on noin 1,615 m³ ja kattilan hyötysuhde 90 %.



Kuva 5.16. Jämä-Moon 8 kW mittaustietoihin perustuva SPF-luku vuodelta 2013–2014.

Yksinkertaisella laskentamenetelmällä lasketussa arvossa on oletettu, että lisälämmitys tuotetaan sähköllä ja hyötysuhteena on tällöin 100 %. Eri menetelmillä ratkaistujen SPF-lukujen keskiarvo on 2,34.

Taulukossa 5.11 on esitetty referenssikohteiden A ja B mittaustulokset. Kohteessa A on korkeampi SPF-luku kuin kohteessa B. Lukujen eroon vaikuttavia tekijöitä on käyttöveden huomioiminen kohteen B SPF-luvun laskennassa. Lisäksi kohteessa B menoveden lämpötila on huomattavasti korkeampi kuin kohteessa A. Korkea menoveden lämpötilan syynä on lämmönjakojärjestelmänä toimiva vanha alkuperäinen patteriverkosto. Patteriverkoston menoveden lämpötila huippupakkasella saattaa olla jopa yli 70 astetta. Lattia-
lämmitysverkoston menoveden lämpötila on maksimissaan 45 astetta. Lisäksi kohteessa A SPF-luku (tilat) ei sisällä käyttöveden lämmitystä toisin kuin kohteessa B.

Taulukko 5.11. Kaukora Oy:n teettämän kahden Jämä-Moon ilma-vesilämpöpumpun kenttämittauksen tulokset.

	A	B
Lämmitysenergiankulutus [MWh]	15	14,5
Lämpimän käyttöveden kulutus [kWh]	-	820
Sähkö- ja lisäenergiankulutus [kWh]	4545	6733
Lämpöpumpun tuottama energia [kWh]	10534	13401
Vuoden keskilämpötila ulkona [°C]	5,7	5,7
sisälämpötila [°C]	19–21	21
SPF	2,3 (tilat)	2 (tilat+kv)

SPF-lukujen välillä on eroavaisuuksia ja yksi syy ovat laskentamallissa tehdyt yksinkertaistukset. Laskennassa ei oteta huomioon lämpötilavälien sisällä tapahtuvia muutoksia keruupuolen lämpötilassa. Lisäksi lämpöpumpun antotehon laskenta perustuu laboratoriomittaustuloksiin. Niben laskentaohjelman lukema on myös teoriaan perustuva laskennallinen lukema. Yksityiskohtaisen laskentamallin (S-malli) ja Niben laskentamallin (NIBE) luvut ovat siten vertailukelpoisia keskenään. On kuitenkin otettava huomioon, että Niben mitoitusohjelma laskee lämpöpumpun anto- ja ottotehon sekä lämpökertoimen tapauskohtaisesti. Rakentamismääräyskokoelman laskentaohjeen *D5* lukema perustuu puolestaan lämpöpumpun nimellistehoon ja lämmönjako lämpötilaan. Referenssi-kohteen mittaustuloksiin perustuva lukema (Ref.) on kaikista vertailtavista luvuista alhaisin.

6 SPF-LUVUN VAIKUTUS E-LUKUUN

Edellä on todettu, että E-luku on rakennuksen energiakertoimella painotettu lämmityksen ostoenergia pinta-alaa kohden [kWh/m^2]. Lämmitykseen kuluvaan ostoenergiaan vaikuttaa rakennuksen lämpöenergian kulutuksen lisäksi lämmöntuottojärjestelmä ja lämmöntuottojärjestelmän hyötysuhde. Suorasähkölämmitteisen rakennuksen lämpöenergian tarve on sama kuin lämmitykseen kuluva sähköenergia, sillä lämmöntuottojärjestelmän hyötysuhde on 100 %. Lämpöpumppulämmitteisessä rakennuksessa ostoenergian määrään vaikuttaa lisälämmitysenergian määrä sekä lämpöpumpun otto- eli sähköenergian määrä. Lämpöpumpun otto- ja lisäenergian määrä vaikuttavat lämpöpumpun lämmityksen vuosihyötysuhteeseen eli SPF-lukuun. Rakennuksen lämmitysenergia jaetaan puolestaan lämpöpumpun SPF-luvulla, jolloin saadaan selvitettyä lämmitykseen kuluva sähköenergia E-luvun laskennassa.

Tässä kappaleessa tarkastellaan referenssikohteen A mittaustuloksista laskettua E-lukua lämpöpumpun eri SPF-luvuilla. Työssä esitetyt referenssikohteen E-luvut eivät ole vertailukelpoisia standardiolosuhteissa ja *Rakentamismääräyskokoelman D5 laskentaohjeen* mukaisesti ratkaistuille E-luvuille. Vertailun tarkoitus on selvittää SPF-luvun vaikutusta E-lukuun. Vertailun tarkoitus ei ole selvittää mittaustiedoista ratkaistujen E-lukujen ja laskentaohjeen D5 avulla ratkaistuja E-lukujen eroavaisuutta. Tämä voisi olla erillinen tutkimusaihe. Vertailu tehdään neljällä eri SPF-luvulla joita ovat SPF tilat (NIBE), SPF tilat (S-malli), SPF tilat (D5) ja SPF tilat (ref. A).

6.1 Ilma-vesilämpöpumppu referenssikohteessa A

Referenssikohteen lämmityksen sähköenergiankulutus vuosilta 2006–2010 on esitetty taulukossa 5.10. Ostoenergian määrä pinta-alaa kohden on lämmitykseen kuluvaan sähköenergian ja rakennuksen lämmitettävän pinta-alan osamäärä. E-luku on ostoenergian ja energiamuotokerroimen tulo. Sähkön energiamuotokerroin on 1,7. Tarkasteltavat E-luvut, jotka perustuvat referenssikohteen A mittauslukemiin, on ratkaistu kaavalla (6.1).

$$E = \frac{f_{\text{energiamuoto}} \frac{Q_{\text{ostoenergia(mittaus)}}}{SPF_{\text{tilat}}}}{A_{\text{netto}}} \quad (6.1)$$

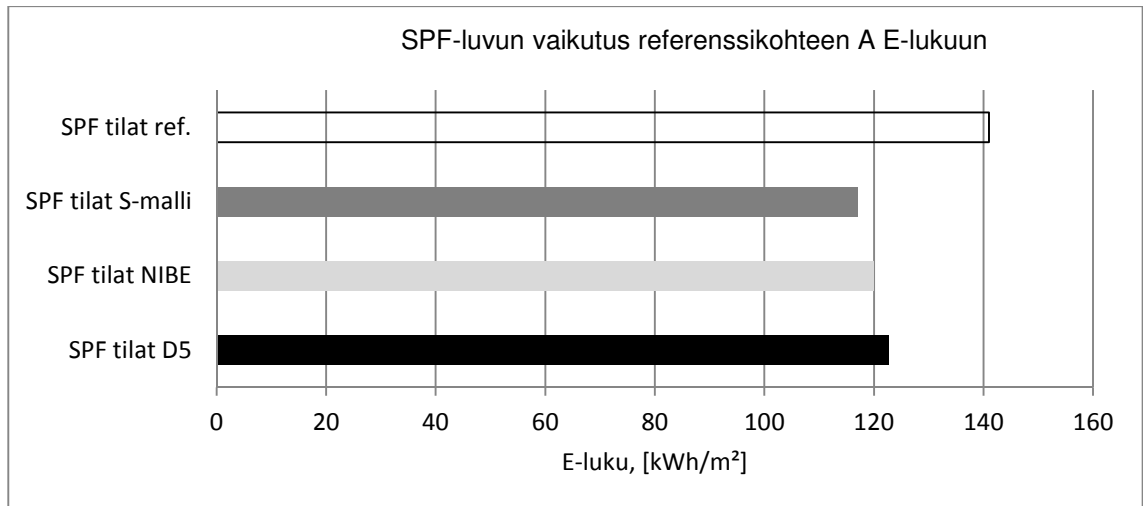
jossa

$Q_{\text{ostoenergia(mittaus)}}$	on referenssikohteen A mitattu ostoenergia
E	on rakennuksen energialuku
$f_{\text{energiamuoto}}$	on lämmitysenergiamuodon energiamuotokerroin
A_{netto}	on rakennuksen lämmitettävä nettopinta-ala
SPF_{tilat}	on lämpöpumpun lämmityksen vuosihyötysuhde

E-luvun laskennassa tulee ottaa huomioon koko lämmitysenergian tarve ja käyttöveden kulutus. Referenssikohteessa A lämpöpumpulla ei lämmitetä käyttövettä. Käyttöveden kulutus on kuitenkin otettu huomioon mitatussa ostoenergian määrässä. Taulukossa 6.1 on esitetty kaavalla (6.1) ratkaistut E-luvut käyttäen referenssikohteen A tietoja ja Jämä-Moon 10 kW lämpöpumpun SPF-lukuja. Laskennassa on hyödynnetty referenssikohteen sähköenergiankulutuslukemia vuosilta 2006–2010. Laskennassa SPF-luvut on vakioitu. Vertailu tehdään neljällä eri SPF-luvulla, joita ovat SPF tilat (NIBE), SPF tilat (S-malli), SPF tilat (D5) sekä SPF tilat (ref. A). E-luvut vuoden 2010 mittaustuloksista on esitetty kuvassa 6.1.

Taulukko 6.1. Referenssikohteen A mittaukseen perustuvat E-luvut eri ilma-vesilämpöpumpun SPF-luvuilla perustuen vuosien 2006–2010 mittaustietoihin.

E-luku, [kWh/m ²]	2006	2007	2008	2009	2010
Sähkö	327	332	308	348	325
SPF tilat D5: 2,65	124	125	116	131	123
SPF tilat NIBE: 2,7	121	122	113	128	120
SPF tilat S-malli: 2,78	118	119	111	125	117
SPF tilat ref.: 2,3	142	144	134	151	141



Kuva 6.1. Referenssikohteen A E-lukuvertailu Jämä-Moon 10 kW ilma-vesilämpöpumpun SPF-luvuilla tarkasteltuna vuonna 2010.

Referenssikohteen A nettopinta-ala on 110 m². Uudisrakennuksen määräyksellä E-luvun tulee olla alle 204 kWh/m². Suoralla sähkölämmityksellä rakennus ei täytä uusia E-lukuvaatimuksia. Ilma-vesilämpöpumppu on pienentänyt ostoenergian määrää kohteessa noin 40 %. Ilmavesilämpöpumpulla mittaustuloksista tarkasteltuna rakennus täyttää uuden E-lukuvaatimuksen.

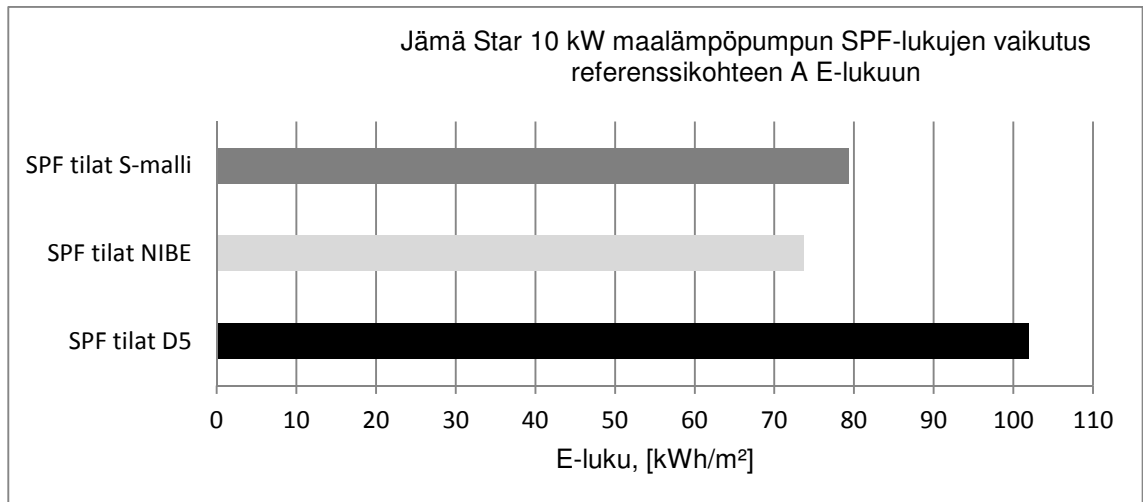
Pieni E-luku indikoi rakennuksen energiatehokkuudesta. Taulukosta 6.1 nähdään eri SPF-lukujen vaikutus E-lukuun. E-luvun suuruus vaihtelee eri vuosina n. 30 kWh/m². Kuvassa 6.1 on esitetty vuoden 2010 teoreettinen E-luku eri SPF tilat luvuilla. SPF tilat (S-malli) ja SPF tilat (NIBE) eroavat n. 3 kWh/m². Yksinkertaisella laskentasovellusmallilla ratkaistu SPF tilat (S-malli) lukema on luvuista suurin, ja antaa siten matalimman E-lukeman. Referenssikohteesta mitattu SPF tilat (ref. A) luku on luvuista matalin ja antaa heikoimman E-luvun.

6.2 Maalämpöpumppu referenssikohteessa A

Jämä Star 10 kW SPF-lukujen vaikutusta E-lukuun tarkastellaan referenssikohteen A mitattujen energiankulutustietojen avulla. Tarkastelu on teoreettinen, mutta todentaa kuitenkin eri keinoin määritettyjen SPF-lukujen vaikutuksen rakennuksen mittauksiin perustuvaan energiatehokkuuslukuun. Taulukossa 6.2 on esitetty kaavalla (6.1) ratkaistut E-luvut käyttäen referenssikohteen A tietoja ja Jämä Star 10 kW lämpöpumpun SPF-lukuja. Laskennassa on hyödynnetty referenssikohteen sähköenergiankulutuslukemia vuosilta 2006–2010. Laskennassa SPF-luvut on vakioitu. E-luvut on esitetty kuvassa 6.2.

Taulukko 6.2. Referenssikohteen A mittaukseen perustuvat E-luvut eri maalämpöpumpun SPF-luvuilla perustuen vuosien 2006–2010 mittaustietoihin.

E-luku, [kWh/m ²]	2006	2007	2008	2009	2010
Sähkö	327	332	308	348	325
SPF tilat D5:3,2	102	104	96	109	102
SPF tilat NIBE: 4,41	74	75	70	79	74
SPF tilat S-malli:4,1	80	81	75	85	80



Kuva 6.2. Referenssikohteen A E-lukuvertailu Jämä Star 10 kW maalämpöpumpun SPF-luvuilla tarkasteltuna.

Taulukosta 6.2 huomataan eri SPF-lukujen vaikutus E-lukuun. E-luvun suuruus vaihtelee kunakin vuonna n. 30 kWh/m². Kuvassa 6.2 on esitetty vuoden 2010 teoreettinen E-luku eri SPF tilat luvuilla. SPF tilat (S-malli) ja SPF tilat (NIBE) eroavat 6 kWh/m². Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 SPF tilat (D5) luvulla ratkaistu E-luku on korkein.

Mittaustuloksiin perustuvasta E-lukuvertailusta voidaan havaita SPF-luvun merkitys rakennukselle laskettavaan E-lukuun. E-lukujen erot eri SPF-luvuilla laskettuna ovat huomattavat. Molemmissa lämpöpumpuissa pienin ero on yksinkertaisella laskenta-sovellusmallilla ja Niben lämpöpumpun mitoitusohjelmalla SPF-luvuilla ratkaistujen E-lukujen välillä. Huomattava ero ilma-vesilämpöpumppujen ja maalämpöpumppujen osalta on Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5 lukemissa. Ilmavesilämpöpumpussa SPF tilat (D5) lasketulla arvolla E-luku on lähes sama muihin lukuihin verrattuna. Maalämpöpumpussa SPF tilat (D5) arvolla ratkaistut E-luvut ovat puolestaan kaikista korkeimmat ja ero muihin E-lukuihin on huomattavan suuri.

7 YHTEENVETO

Eri menetelmin määritetyissä SPF-luvuissa esiintyy merkittävää hajontaa sekä ilma- että maalämpöpumpuissa. SPF-lukujen eroavaisuuteen vaikuttaa moni tekijä ja monen tekijän yhdistäminen. Yksityiskohtaisessa laskentasovellusmallissa vakioidaan lämpötilavälilien olosuhteet ja lämpöpumpun toiminta. Laskentamallissa hyödynnetään lämpöpumpujen tuotetietoja, joiden avulla määritetään lämpöpumpun lämpökerroin sekä anto- ja ottoteho tarkasteltavissa pisteissä. Tarkastelumallin luotettavuuteen vaikuttaa lämpöpumpun laboratoriomittausten lukumäärä. Laskenta perustuu standardimittauksissa saatujen arvojen hyödyntämiseen laskennassa. Lähtötietojen tarkkuudella on siten huomattava merkitys SPF-lukujen luotettavuuteen. Mittapisteiden lukumäärän lisäämisellä eliminoidaan välillisistä laskutoimituksista aiheutuvat laskentapoikkeamat COP-luvun ratkaisussa. Välillisiä laskutoimituksia ovat COP-lukujen interpolointi tai lämpötilakorjaus, jotta saadaan määritettyä lämpökertoimet halutuissa menoveden lämpötiloissa ja keruupiirin lämpötiloissa. Lukemia käytetään muissa laskentavaiheissa. Yksityiskohtaisen laskentasovellusmallin tuloksena saadaan lämpöpumpun vuosihyötysuhde lämmitykselle.

Rakentamismääräyksen laskentaohjeen *D5* ohjeavot eivät ole tapauskohtaisia, eikä lukuun vaikuta rakennuksen kokonaisenergiantarve. Luvut ovat vakioitu kolmelle säävyöhykkeelle ja kolmelle eri menoveden arvolle. SPF-luvut halutuille menoveden lämpötiloille tulee interpoloida taulukoiduista lukemista. Niben laskentaohjelma on lämpöpumpun mitoitukseen tehty työkalu. Ohjelma antaa lämpöpumpun hyötysuhteen ja lämpöpumpun lämmityksen hyötysuhteen, jossa on otettu huomioon myös lisälämmitysenergia. Laskenta saattaa olla hyvin samankaltainen yksityiskohtaisen laskentasovellusmallin kanssa, sillä lähtötiedot ovat melko kattavat. Laskennassa otetaan huomioon mm. säävyöhyke, rakennuksen energiantarve ja lämmönjakotapa. Tarkkaa laskentaperustaa laskentaohjelmasta ei ole tiedossa, ja siten tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia. Tulosten tarkastelussa on hyvä ottaa huomioon laskentamallien eri käyttötarkoitukset ja erilainen laskentaperusta.

SPF-luvun määritelmä on hyvin laaja. Yksinkertaisimmillaan SPF-luvusta voidaan käyttää nimitystä lämpöpumpun vuosihyötysuhde. Nimi ei tällaisenaan kuitenkaan kerro millä rajauksella laskenta on tehty. Edellä olemme todenneet, että SPF-luvun laskennassa voidaan käyttää hyvin monenlaista rajausta. Luvun laskenta voidaan rajata ainoastaan lämpöpumppuun, jolloin puhutaan lämpöpumpun SPF-luvusta. Niben laskentaohjelma laskee SPF-luvun lämpöpumpulle ja koko järjestelmälle. Vain lämpöpumpulle laskettu

SPF-luku on korkeampi verrattuna SPF-lukuun, johon on sisällytetty myös lisälämmitysenergia. Lämpöpumpun SPF-luku tarkoittaa lämpöpumpun vuotuista anto- ja ottoenergian suhdetta. Mikäli lämpöpumpun vuosihyötysuhdetta käytetään lämpöpumpun lämmityksen hyötysuhteena esimerkiksi E-luvun laskennassa, on E-luku harhaan johtava. Lämpöpumpun lämmityksen SPF-luku sisältää myös lisälämmitysenergian. Lämmityksen SPF-luku laskennan rajausta pitää sisällään keruupuolen komponenttien sähkönkulutuksen, kompressorin sähkönkulutuksen ja lisälämmitysenergian. Lämmönjakokomponenttien sähkönkulutus on otettu huomioon rakennuksen energiantarpeen laskennassa. SPF-luvun käytössä tulisi ilmoittaa laskennan rajausta, jotta voidaan varmistua luvun oikeasta käytöstä ja tuloksista.

SPF-luku käsitteenä voidaan ymmärtää monella tavalla ja lukua voidaan käyttää vahingossa tai markkinointitarkoituksessa väärin. SPF-luku voidaan rajauksen lisäksi laskea ja määrittää eri tavoilla. Eri tavoin lasketut ja määritetyt lukemat antavat eri arvoja, vaikka rajapinnat eri laskenta- ja määrittämismenetelmissä ovat samat. Lukujen käyttäytymisessä ei ollut huomattavissa suurta yhteistä ja toistuvaa linjaa, joka olisi ollut huomattavissa sekä ilma-vesilämpöpumpuissa että maalämpöpumpuissa. Kummassakin pumpputyypissä oli kuitenkin huomattavissa toistuvuutta lukujen käyttäytymisessä toistensa suhteen.

Maalämpöpumpuissa verrattaessa Niben laskentaohjelman avulla laskettuja SPF-lukuja yksityiskohtaisella laskentasovellusmallilla laskettuihin SPF-lukuihin, havaittiin lukujen ero kasvun siirryttäessä matalasta lämmönjakolämpötilasta korkeaan. Lukujen ero kasvoi siirryttäessä 1-2 säävyöhykkeestä 4 säävyöhykkeeseen. Yksityiskohtaisella laskentamallilla ratkaistut arvot olivat maalämpöpumpuissa noin *Rakentamismääräyksen laskentaohjeen D5* mukaisten arvojen sekä Niben lämpöpumppujen mitoitusohjelmalla ratkaistujen lukujen keskiarvo. Ilma-vesilämpöpumpuissa ei ollut havaittavissa yhtä selkeää käyttäytymistä lukujen suhteen kuin maalämpöpumppujen SPF-luvuissa. *Rakentamismääräyksen laskentaohjeella D5* ratkaistut lukemat ja yksityiskohtaisella laskentamallilla ratkaistut lukemat olivat hyvin lähellä toisiaan. Menoveden lähenyessä 50 astetta, SPF luvut D5, NIBE sekä S-malli lähestyivät selkeästi toisiaan. Lukujen käyttäytyminen on havaittavissa selkeästi ilma-vesilämpöpumppujen osalta liitteissä 3-5 ja maalämpöpumppujen osalta liitteissä 6-10.

Jatkotutkimuksena voitaisiin selvittää Niben lämpöpumppumitoitusohjelman laskenta-perusta ja vertailla SPF tilat (S-malli) ja SPF tilat (NIBE) lukuja keskenään. Lämpöpumppujen teoreettista lämmityksen hyötysuhdetta voidaan hyödyntää teoreettisessa E-luvun laskennassa. Kokonaisuutta ajatellen, tulee kuitenkin varmistua mahdollisista päällekkäisyyksistä laskentarajauksissa. Teoreettinen tarkastelu on kuitenkin vain yksi malli. Tämän tutkimuksen tuloksena on havaittu SPF-luvun rajauksen merkitys, eri ratkaisumenetelmillä määritettyjen SPF-lukujen eroavaisuus ja SPF-lukujen vaikutus rakennuksen laskennalliseen energiatehokkuuslukuun.

LÄHTEET

- [1] D3. Suomen Rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Rakennusten energiatehokkuusmääräykset ja ohjeet 2012. Helsinki 2011.
- [2] D5 Suomen Rakentamismääräyskokoelma Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Rakennuksen energiakulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki 2011.
- [3] Nordman, R., Andersson, K., Axcell, M., Lindahl, M. 2010. Sweden Calculation methods for SPF for heat pump systems for comparison, system choice and dimensioning. Borås. SP Technical Research Institute of Sweden. SP Report 2010:49. 54 s.
- [4] Eskola, L., Jokisalo, J., Sirén, K. 2011. Lämpöpumppujen energialaskentaopas 3.10.2012.
- [5] Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisu 36/2008.
- [6] Kalliomäki, P. Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Muistio 28.3.2011.
- [7] Ehdotus energiansäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. Työ- ja elinkeinoministeriö energiatehokkuustoimikunnan mietintö 9.6.2009.
- [8] Teknologia kehittämiskeskus (TEKES), Rakennustuoteteollisuus (RTT), Suomen talotekniikan kehityskeskus (TAKE). Rakennusten energialaskelma raportti.2000.
- [9] Lappalainen. Energia- ja Ekologiakäsikirja- suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki 2010. Rakennustieto Oy. 200 s.
- [10] CEN/TR 156159. Selvitys rakennusten energiatehokkuusdirektiiviin (EPBD) liittyvistä eurooppalaisista standardeista ja niiden liittymisestä toisiinsa. Helsinki 2008, Suomen standardisoimisliitto. 85 s.
- [11] Tuomaala, M., Ahtila, P., Haikonen, T., Kalenoja, H., Kallionpää, E., Rantala, J., Tuominen, P., Shemeikka, J., Rämä, M., Sipilä, K., Pursiheimo, E., Forsström, J., Wahlgren, I., Lahti, P. Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit. Helsinki 2012. Aalto-yliopiston julkaisusarja Tiede+Teknologia 1/2012. 334 s.

- [12] Kauppinen, J., Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä. Muistio 4.6.2012.
- [13] Suomalainen, T., Kalema, T., Esimerkkilaskelmia pientaloille/E-lukuvaatimusten täytyminen. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto, konstruktitekniikan laitos. 26 s.
- [14] Kurnitski, J. Energiamääräykset 2012- Opas uudisrakennusten energiamääräysten soveltamiseen. Helsinki 2012. Suomen Rakennusmedia Oy. 150 s.
- [15] Keto, M. Energiamuotojen kertoimet rakennusten energiatehokkuuden määrittämiseksi. Helsinki 2010. Aalto-yliopiston teknillinen korkeakoulu, Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta, Energiatekniikan laitos. 90+13 s.
- [16] Granryd, E., Ekroth, I., Lundqvist, P., Melinder, Å., Palm, B., Rohlin, P. Refrigerating engineering part I. Stockholm 2005. Royal Institute of Technology.
- [17] Karvinen, R. Lämpötekniikan perusteet osat I-II, Luentomoniste. Tampere 2012.
- [18] Aittomäki, A. Kylmätekniikka. 4. painos. Porvoo 2012, Suomen kylmäyhdistys ry. 408 s.
- [19] Granryd, E., Refrigerating Engineering part II. Stockholm 2005. Royal Institute of Technology.
- [20] Kananoja, T., Pokki, J., Ahtola, T., Hyvärinen, J., Kallio, J., Kinnunen, K., Luodes, H., Sarapää, O., Tuusjärvi, M., Törmänen, T. ja Virtanen, K. 2013. Geologisten luonnonvarojen hyödyntäminen Suomessa vuonna 2011. Espoo, Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti 203. 44 s.
- [21] SP Sveriges provnings och forskningsinstitut. Stockholm 2004. Årsmätning på fem bergvärmeanläggningar i Sjuhärad. 30+33 s.
- [22] Juvonen, J., Lapinlampi, T. Ympäristöopas Energiakaivo- Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa Helsinki 2013. Ympäristöministeriö. 60 s.

LIITE 1: JÄMÄ-MOON JA JÄMÄ STAR LÄMPÖPUMPPUJEN TUOTETIEDOT

Taulukko L1.1. Jämä-Moon 6-14 ilma-vesilämpöpumppujen tuotetiedot.

Lämpöpumppu	Ulkolämpötila [°C]	-20	-7	0	2	7	15				
	T_m [°C]	50	45	50	45	35	50				
Jämä-Moon 6 kW	Antoteho [kW]	3,1	4,3	4,1	5,3	5,9	5,4	6,8	6,4	6,3	7,6
	COP	1,6	2,4	1,8	2,9	3,7	2,7	4,5	3,6	3,0	3,6
	Ottoteho [kW]	2,0	1,8	2,3	1,8	1,6	2,0	1,5	1,8	2,1	2,1
Jämä-Moon 8 kW	Antoteho [kW]	4,1	5,8	5,7	7,3	8,1	7,4	9,3	8,8	8,6	10,1
	COP	1,8	2,5	2,3	3,0	3,9	2,7	4,2	3,4	3,1	3,5
	Ottoteho [kW]	2,3	2,3	2,5	2,4	2,1	2,7	2,2	2,6	2,8	2,9
Jämä-Moon 10 kW	Antoteho [kW]	5,0	7,1	6,8	8,6	9,4	8,9	10,9	10,4	10,1	11,8
	COP	1,8	2,6	2,3	3,0	3,8	2,8	4,0	3,5	3,2	3,6
	Ottoteho [kW]	2,8	2,7	2,9	2,9	2,5	3,2	2,7	3,0	3,2	3,3
Jämä-Moon 14 kW	Antoteho [kW]	7,0	10,0	9,8	11,9	12,9	12,4	14,6	14,2	14,2	16,6
	COP	1,7	2,4	2,2	2,8	3,4	2,6	3,7	3,2	2,8	3,3
	Ottoteho [kW]	4,2	4,1	4,5	4,3	3,8	4,8	3,9	4,5	5,0	5,1

Taulukko L 1.2. Jämä Star 6-17maalämpöpumppujen tuotetiedot.

Lämpöpumppu	Keruupiirin paluulämpötila [°C]	0	0
	Menoveden lämpötila [°C]	35	45
Jämä Star 6 kW	Antoteho kW]	6,1	5,2
	COP	4,5	3,6
	Ottoteho [kW]	1,4	1,5
Jämä Star 8 kW	Antoteho [kW]	8,0	7,1
	COP	4,6	3,7
	Ottoteho [kW]	1,7	1,9
Jämä Star 10 kW	Antoteho [kW]	9,6	8,6
	COP	4,5	3,6
	Ottoteho [kW]	2,1	2,4
Jämä Star 12 kW	Antoteho [kW]	11,4	10,9
	COP	4,3	3,4
	Ottoteho [kW]	2,7	3,2
Jämä Star 15 kW	Antoteho [kW]	15,4	14,9
	COP	4,3	3,5
	Ottoteho [kW]	3,6	4,2
Jämä Star 17 kW	Antoteho [kW]	16,9	16,1
	COP	4,1	3,4
	Ottoteho [kW]	4,1	4,7

LIITE 2: JÄMÄ-MOON ILMA-VESILÄMPÖPUMPPUJEN SPF-LUVUT (TILAT), 20 000 KWH

Taulukko L2.1. Jämä-Moon 6-14 kW ilma-vesilämpöpumppujen lämmityksen SPF luvut (tilat) 20 000 kWh:n huippuenergiatarpeella.

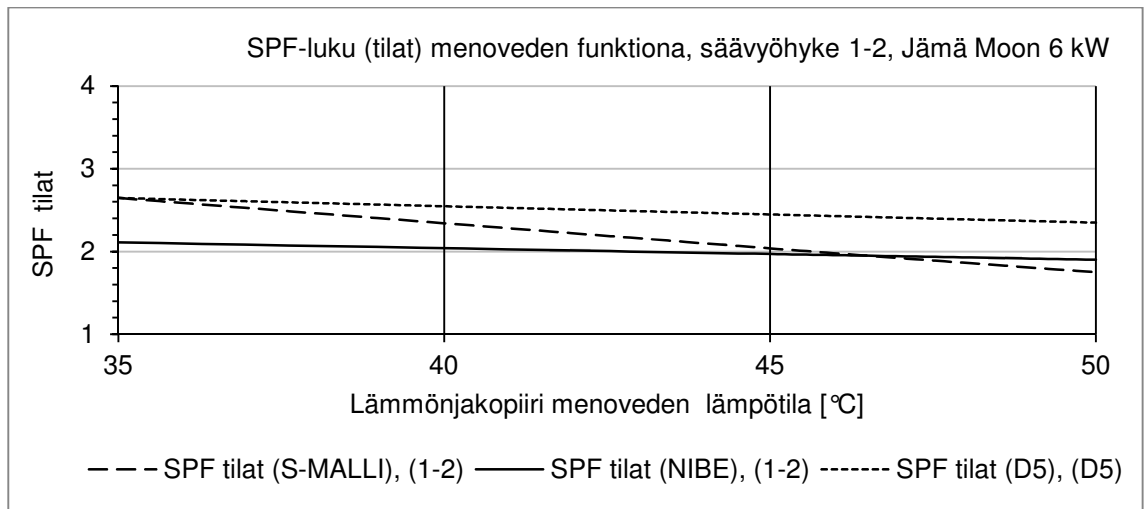
	T_m	35 °C		45 °C		50 °C	
		SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)
Jämä-Moon 6 kW	SPF (1-2)	2,65	2,11	2,04	1,97	1,75	1,90
	SPF (3)	2,55	1,85	1,98	1,75	1,71	1,71
	SPF (4)	2,21	1,67	1,81	1,60	1,57	1,57
Jämä-Moon 8 kW	SPF (1-2)	2,77	2,43	2,26	2,23	2,00	2,14
	SPF (3)	2,69	2,08	2,07	1,95	1,96	1,88
	SPF (4)	2,44	1,83	1,92	1,73	1,82	1,69
Jämä-Moon 10 kW	SPF (1-2)	2,80	2,65	2,34	2,41	2,13	2,29
	SPF (3)	2,67	2,35	2,25	2,16	2,06	2,08
	SPF (4)	2,43	2,08	2,09	1,95	1,91	1,88
Jämä-Moon 14 kW	SPF (1-2)	2,60	3,07	2,20	2,83	2,00	2,73
	SPF (3)	2,50	2,76	2,10	2,56	1,90	2,48
	SPF (4)	2,30	2,49	1,90	2,32	1,80	2,25

LIITE 3: JÄMÄ STAR MAALÄMPÖPUMPPUJEN SPF-LUVUT (TILAT)

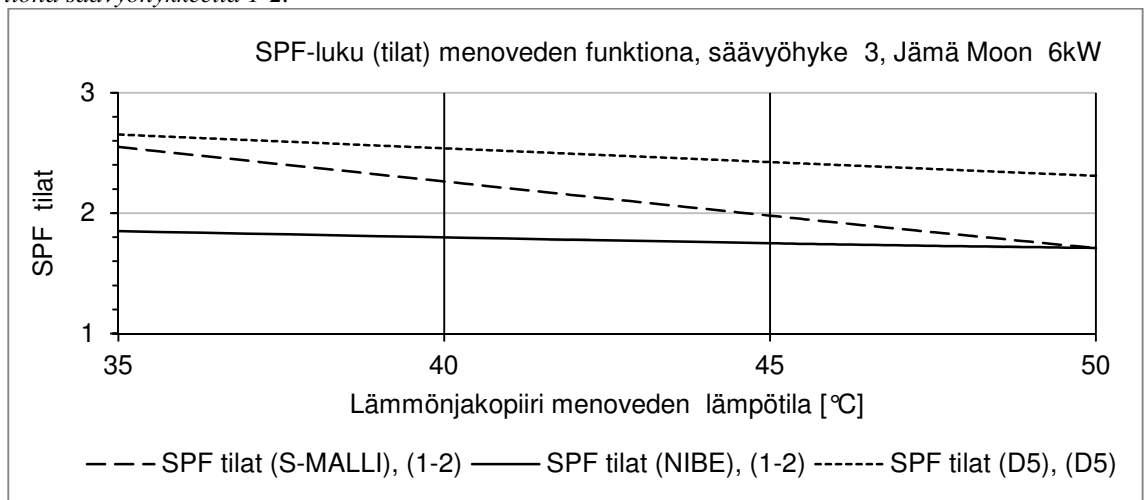
Taulukko L3.1. Jämä Star 6-17 kW maalämpöpumppujen lämmityksen SPF luvut (tilat) 20 000-40 000 kWh:n huippuenergiatarpeella.

	T_m	35 °C		45 °C		50 °C	
		SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)	SPF tilat (S-malli)	SPF tilat (NIBE)
Jämä Star 6 kW	SPF (1-2)	4,03	4,22	3,11	3,70	2,68	3,45
	SPF (3)	3,99	4,26	3,11	3,74	2,68	3,49
	SPF (4)	3,94	4,37	3,08	3,85	2,63	3,6
Jämä Star 8 kW	SPF (1-2)	4,16	4,43	3,37	3,96	2,95	3,73
	SPF (3)	4,13	4,45	3,35	3,98	2,94	3,75
	SPF (4)	4,10	4,49	3,33	4,02	2,93	3,79
Jämä Star 10 kW	SPF (1-2)	4,09	4,41	3,34	3,97	2,95	3,76
	SPF (3)	4,07	4,42	3,32	3,98	2,94	3,77
	SPF (4)	4,04	4,45	3,30	4,00	2,92	3,78
Jämä Star 12 kW	SPF (1-2)	3,90	4,17	3,12	3,64	2,72	3,42
	SPF (3)	2,18	4,19	2,19	3,65	2,42	3,52
	SPF (4)	2,10	4,2	1,77	3,67	1,84	3,44
Jämä Star 15 kW	SPF (1-2)	3,85	4,31	3,22	3,76	2,89	3,53
	SPF (3)	3,83	4,32	3,20	3,76	2,88	3,53
	SPF (4)	3,80	4,34	3,19	3,77	2,86	3,54
Jämä Star 17 kW	SPF (1-2)	3,73	2,67	3,17	2,67	2,87	2,67
	SPF (3)	3,71	2,67	3,15	2,67	2,86	2,67
	SPF (4)	3,68	2,67	3,13	2,67	2,84	2,67

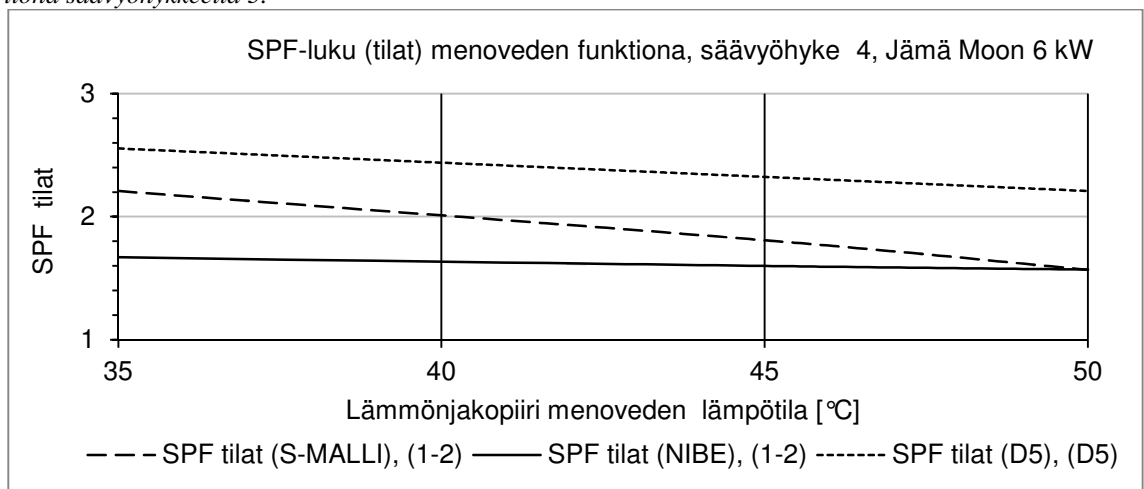
LIITE 4: JÄMÄ-MOON 6 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 20 000 KWH



Kuva L3.1. Jämä-Moon 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

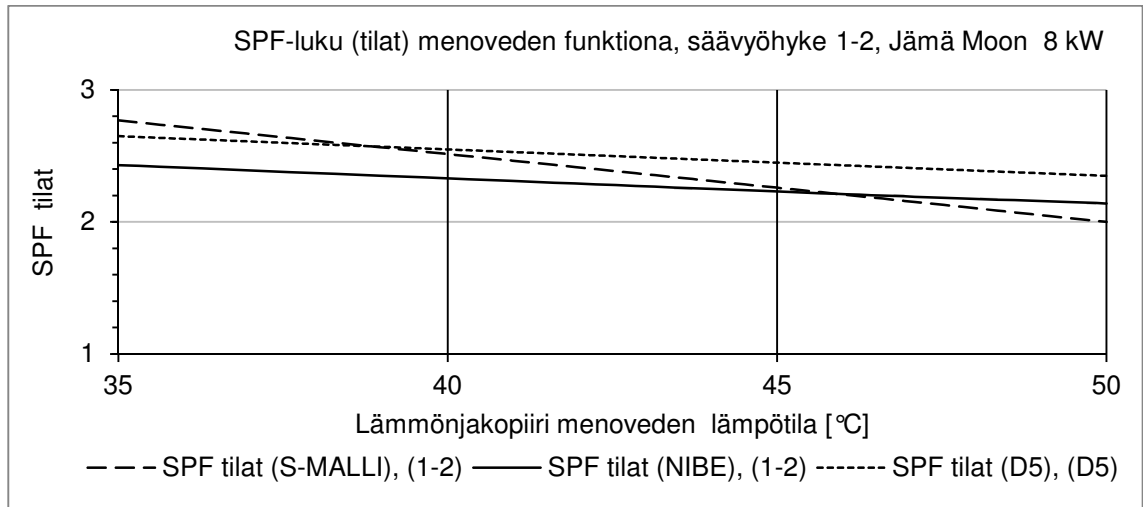


Kuva L3.2. Jämä-Moon 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

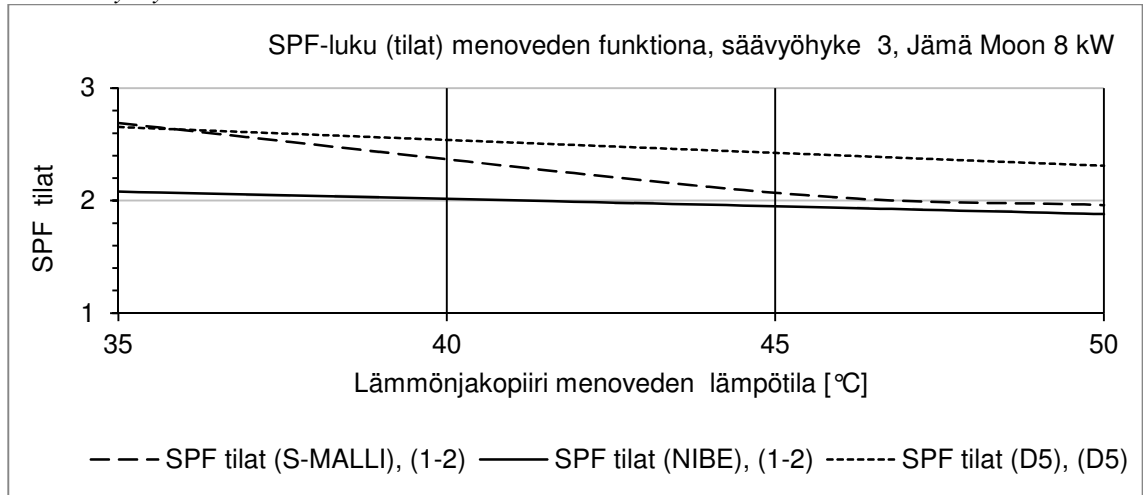


Kuva L3.3. Jämä-Moon 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

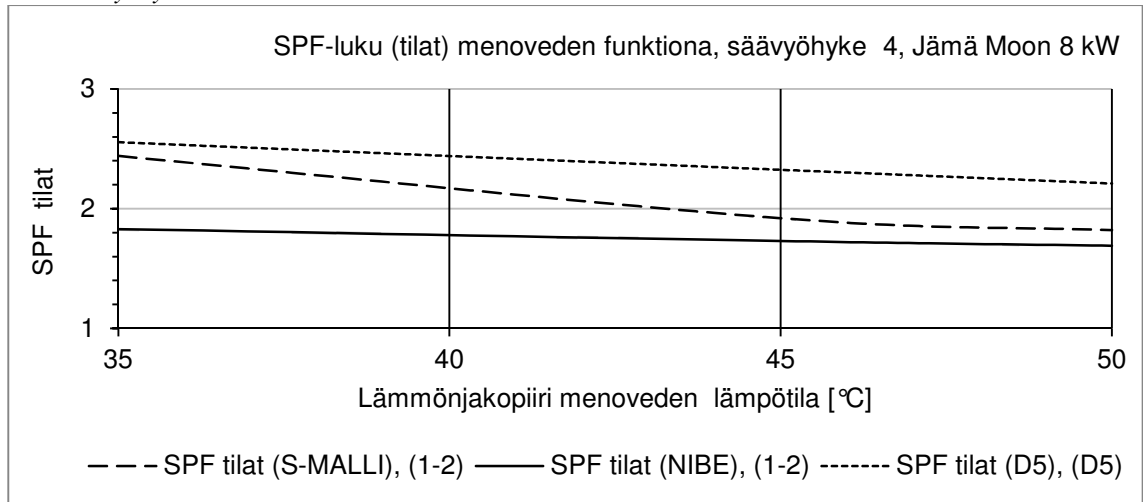
LIITE 5: JÄMÄ-MOON 8 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 20 000 KWH



Kuva L4.1. Jämä-Moon 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

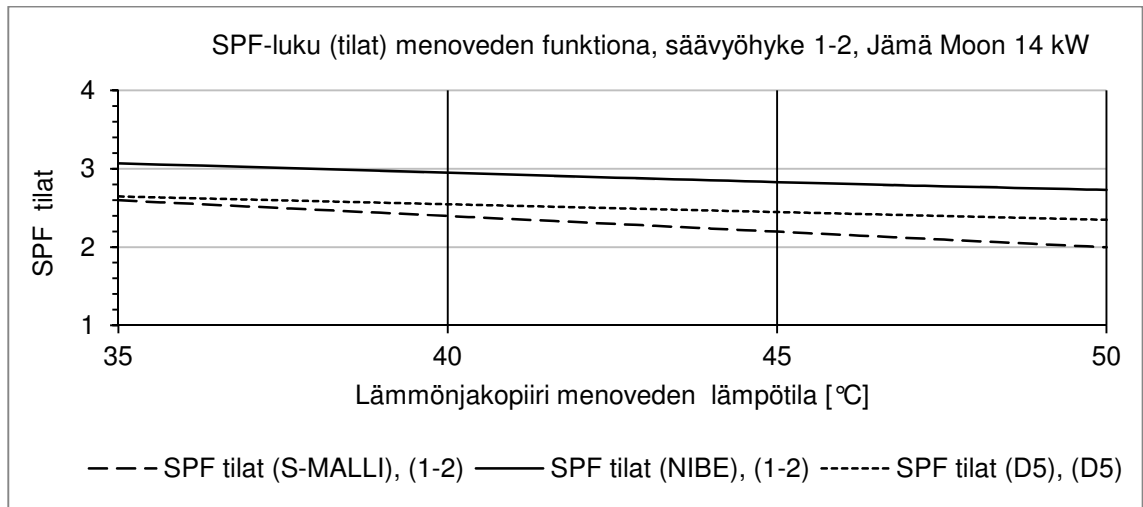


Kuva L4.2. Jämä-Moon 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

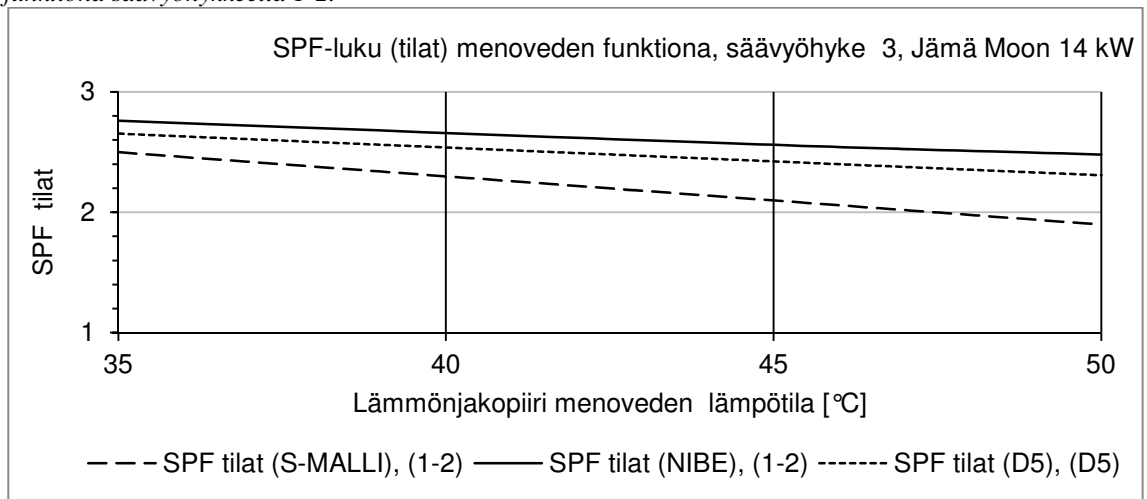


Kuva L4.3. Jämä-Moon 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

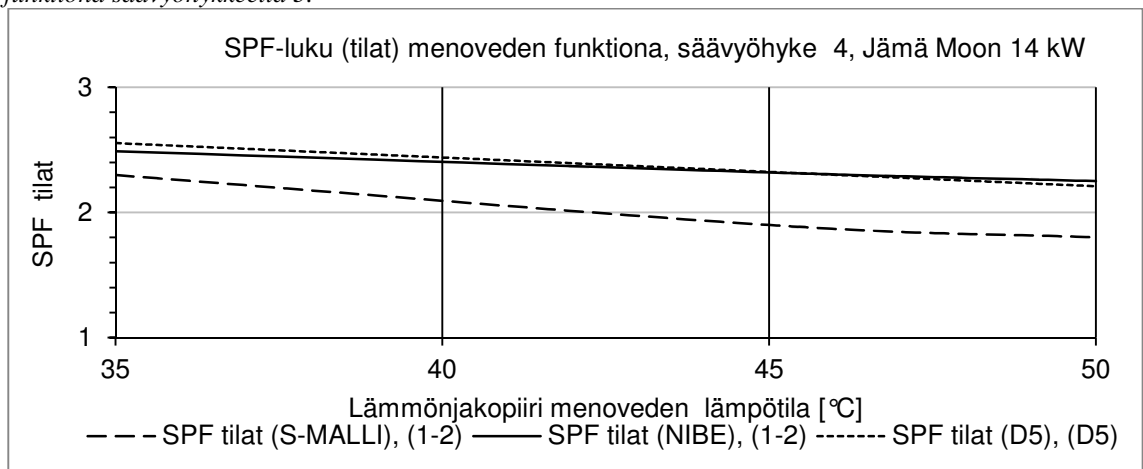
LIITE 6: JÄMÄ-MOON 14 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 20 000 KWH



Kuva L5.1. Jämä-Moon 14 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

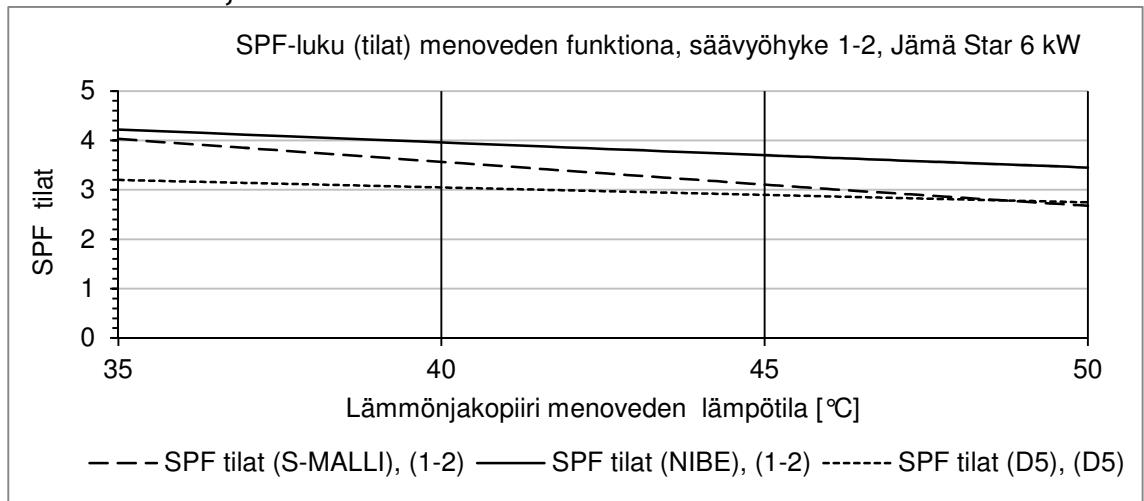


Kuva L5.2. Jämä-Moon 14 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

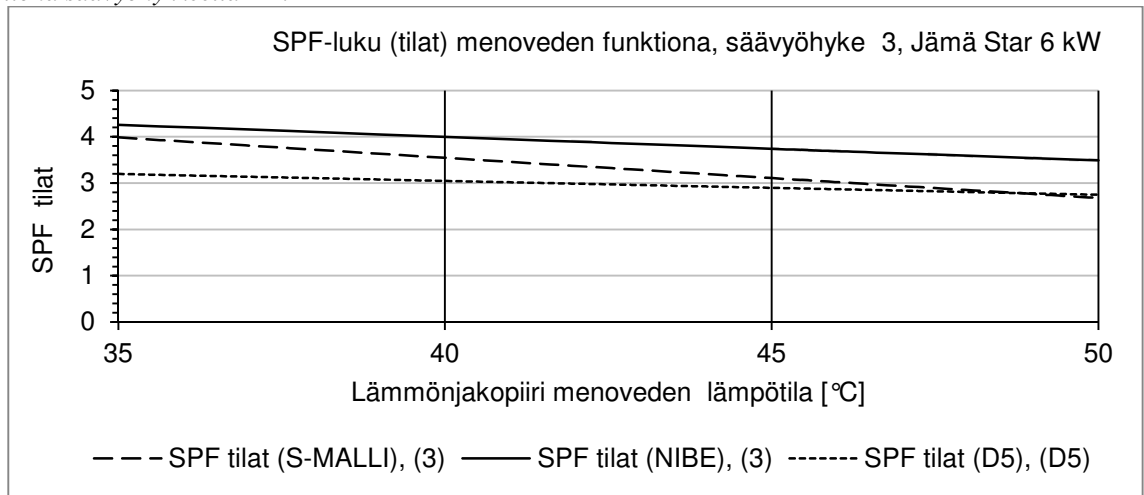


Kuva L5.3. Jämä-Moon 14 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

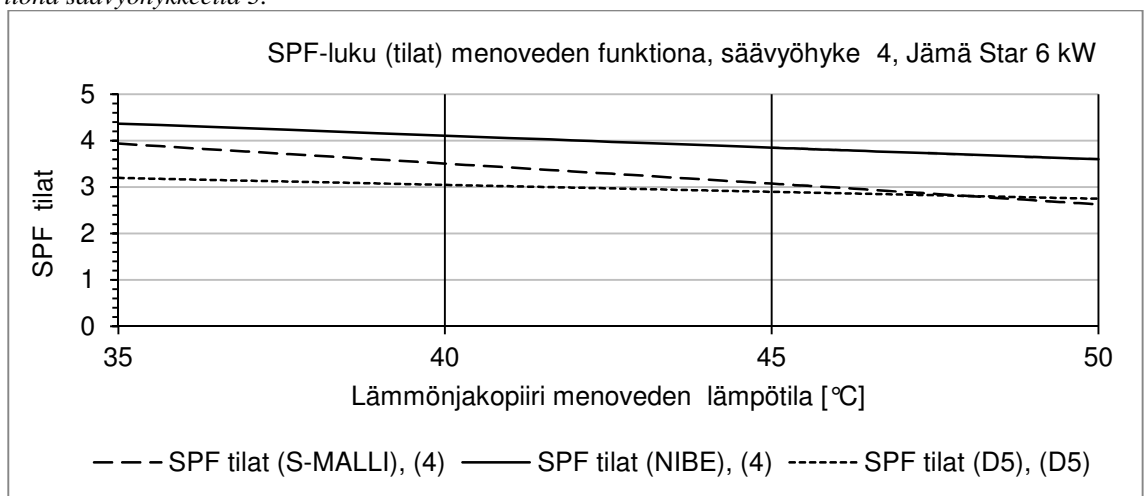
LIITE 7: JÄMÄ STAR 6 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 20 000 KWH



Kuva L6.1. Jämä Star 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

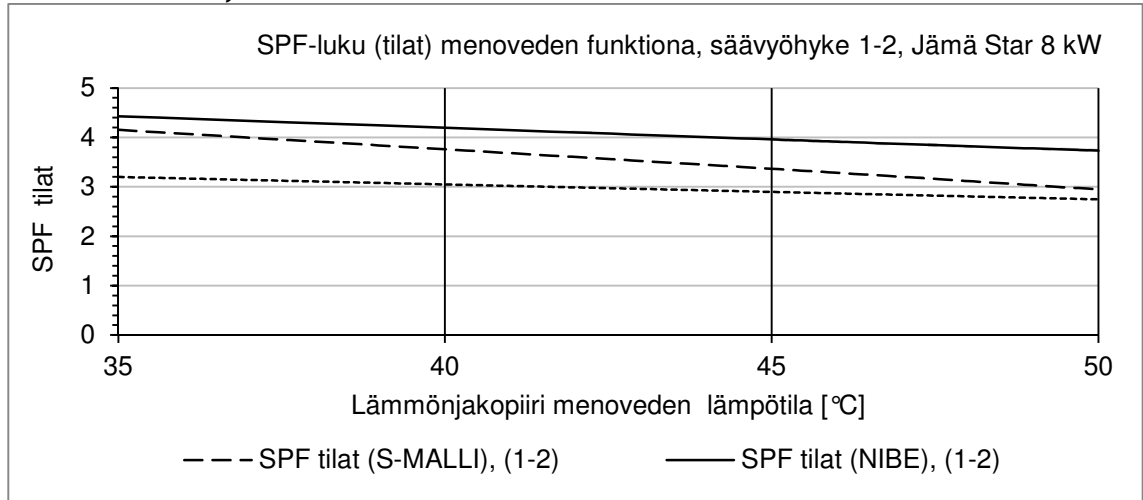


Kuva L6.2. Jämä Star 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

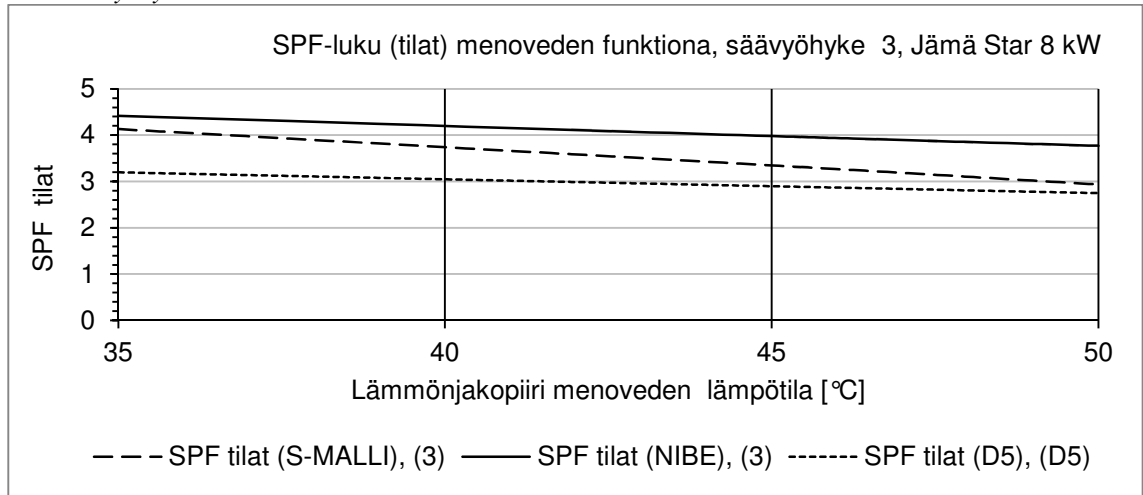


Kuva L6.3. Jämä Star 6 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

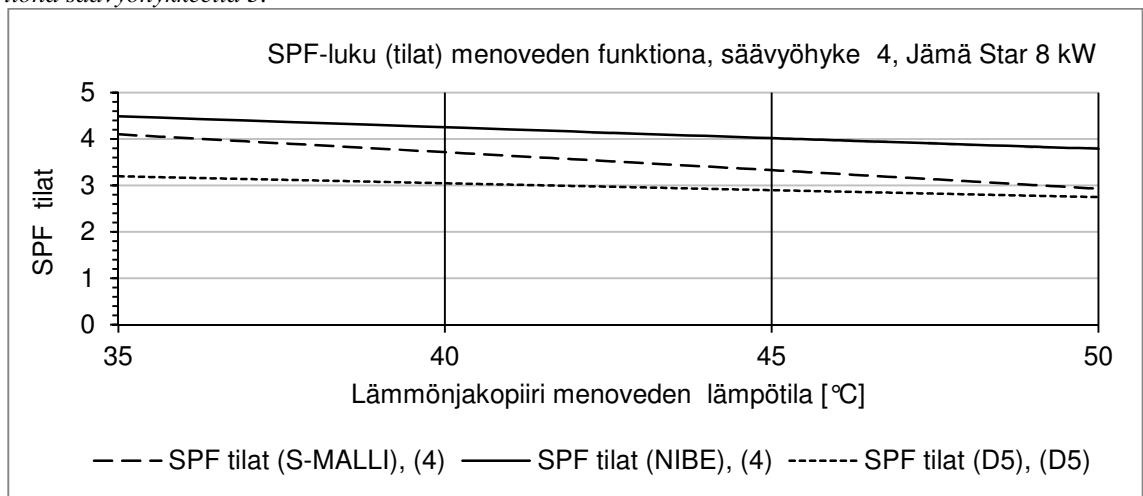
LIITE 8: JÄMÄ STAR 8 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 20 000 KWH



Kuva L7.1. Jämä Star 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

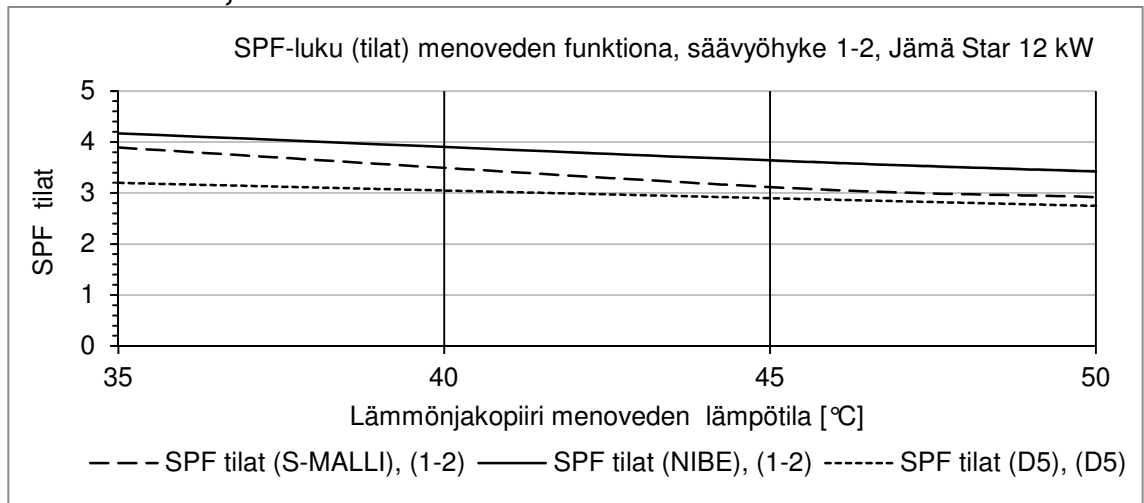


Kuva L7.2. Jämä Star 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

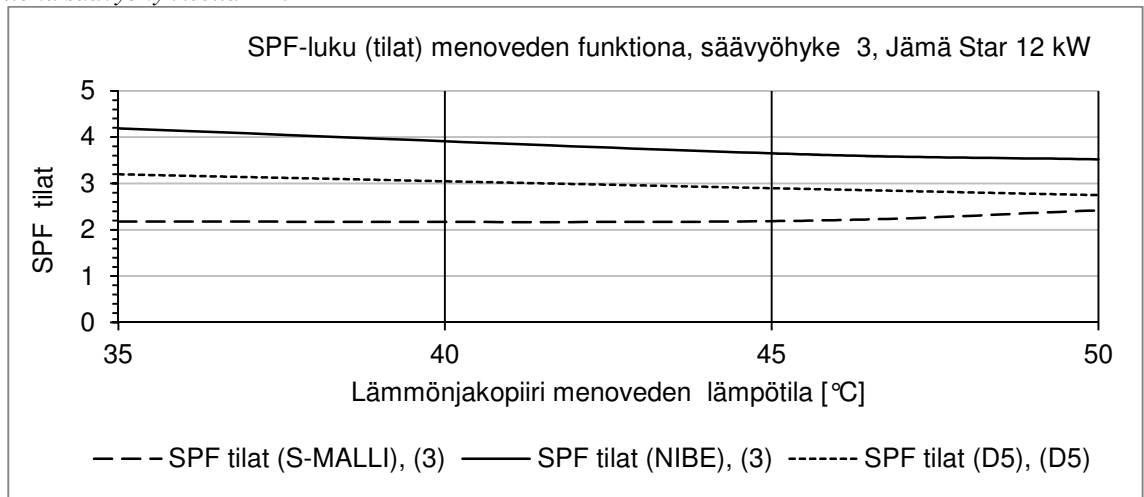


Kuva L7.3. Jämä Star 8 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

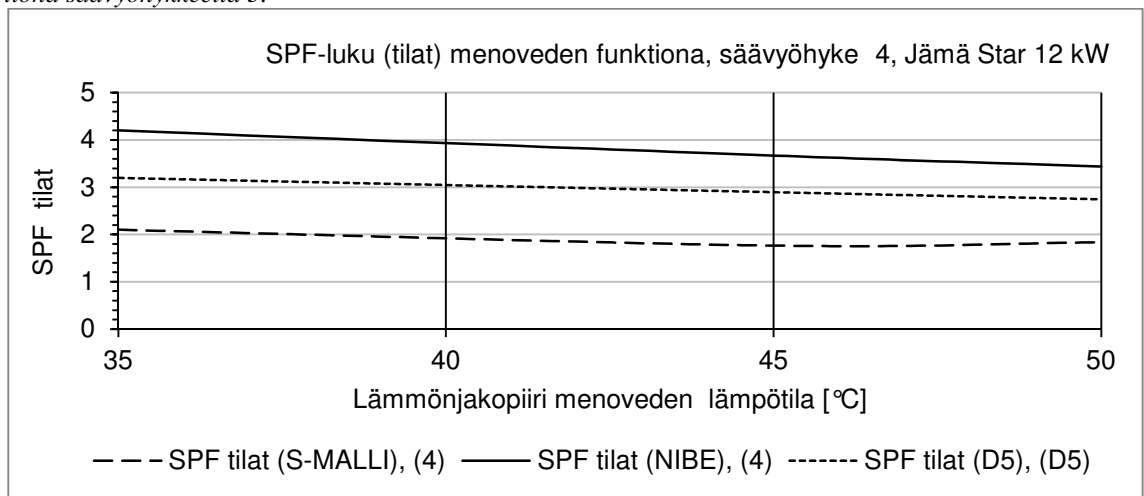
LIITE 9: JÄMÄ STAR 12 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 30 000 KWH



Kuva L8.1. Jämä Star 12 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

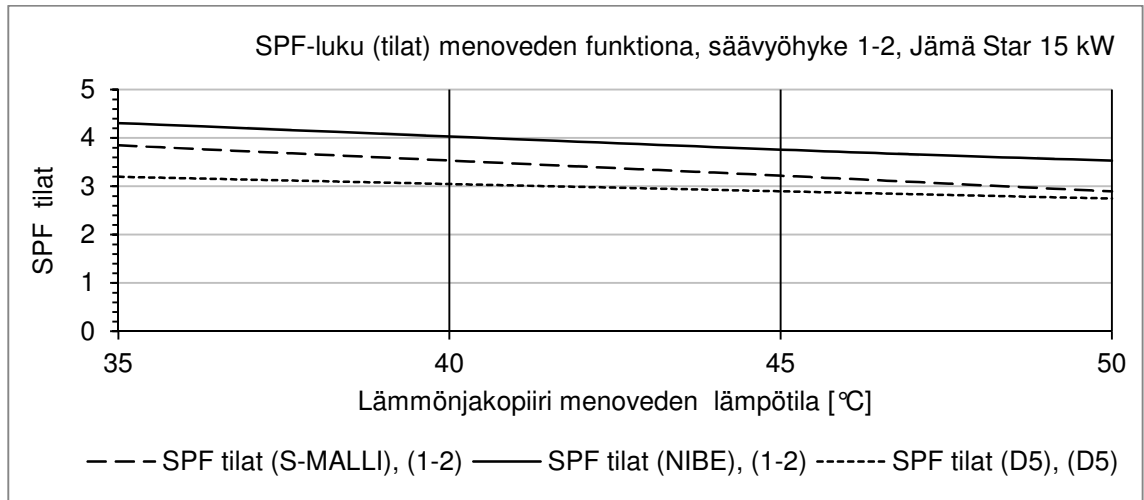


Kuva L8.2. Jämä Star 12 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

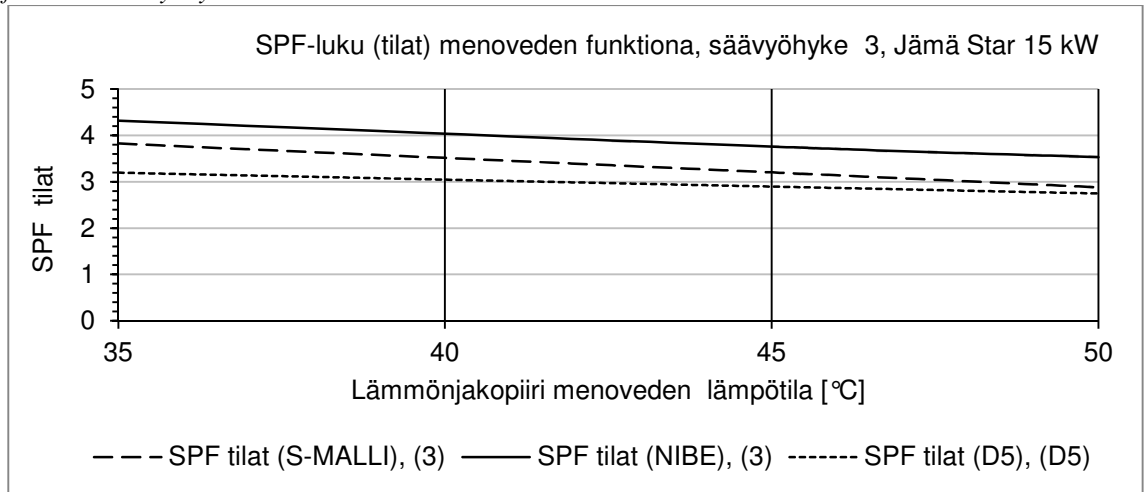


Kuva L8.3. Jämä Star 12 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

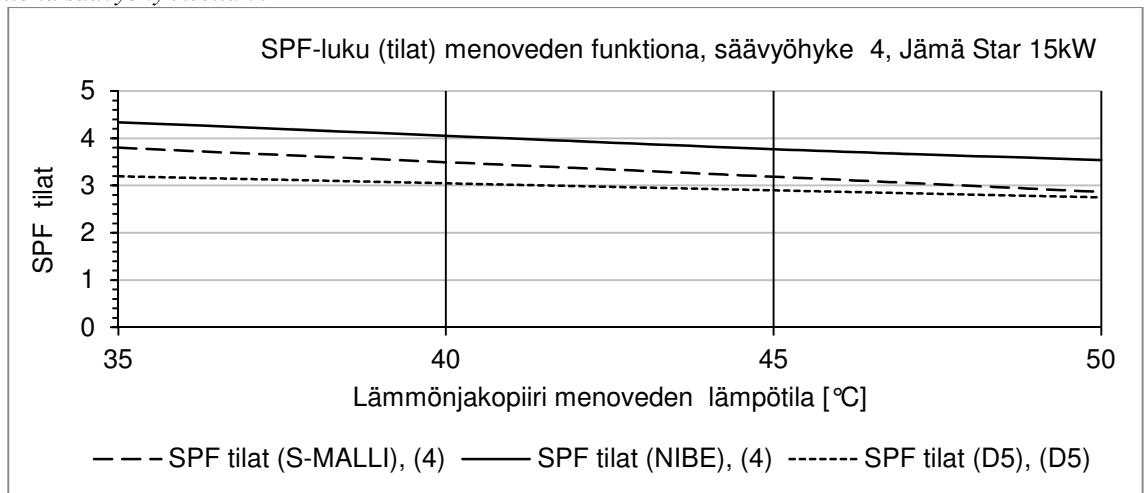
LIITE 10: JÄMÄ STAR 15 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 40 000 KWH



Kuva L10.1. Jämä Star 15 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.

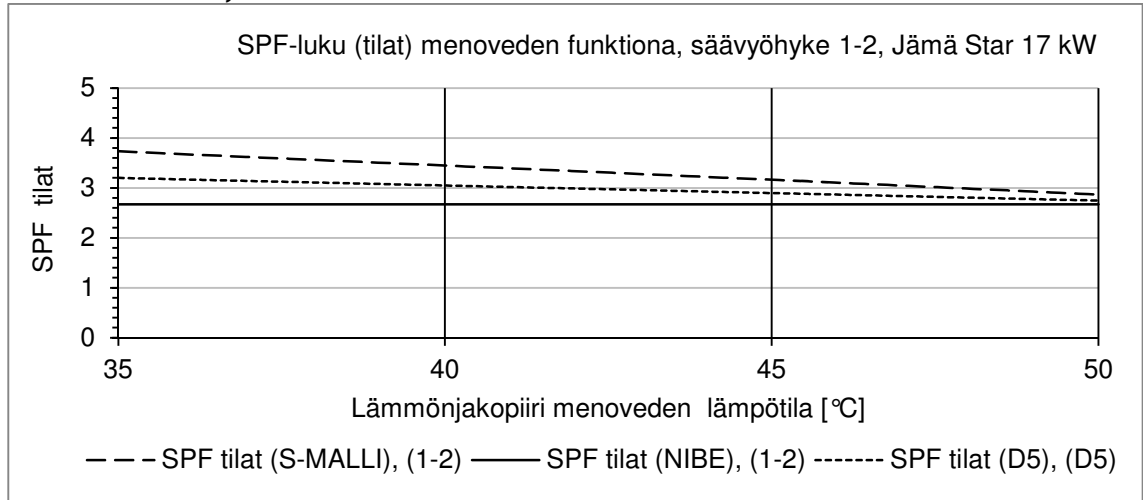


Kuva L10.2. Jämä Star 15 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.

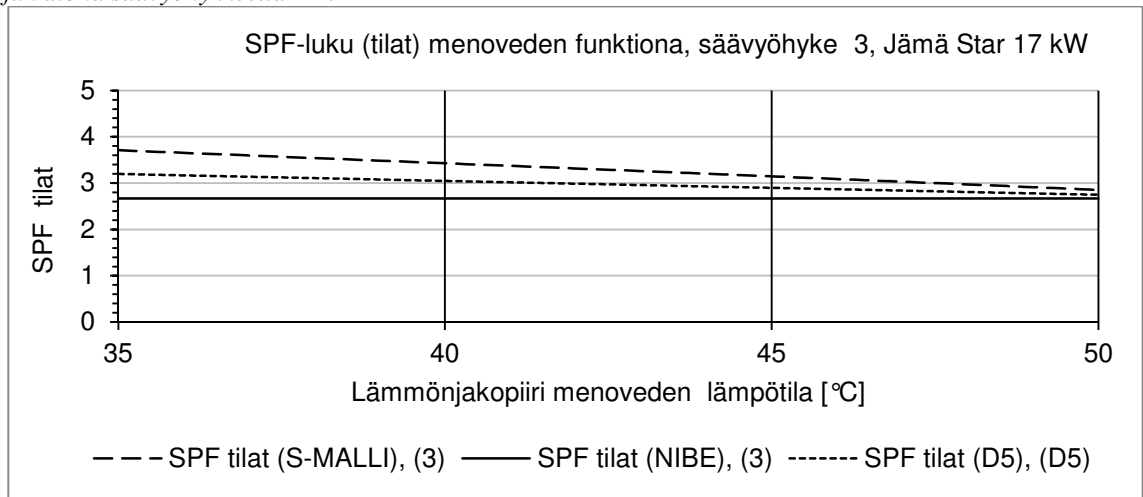


Kuva L10.3. Jämä Star 15 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.

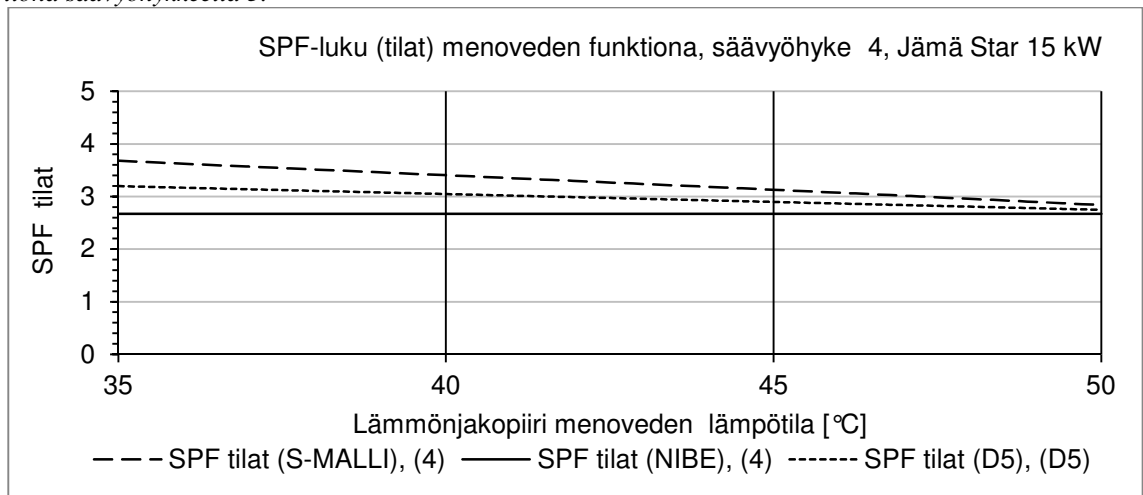
LIITE 11: JÄMÄ STAR 17 KW SPF-LUKU (TILAT) MENOVEDEN FUNKTIONA, 40 000 KWH



Kuva L11.1. Jämä Star 17 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 1-2.



Kuva L11.2. Jämä Star 17 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 3.



Kuva L11.3. Jämä Star 17 kW lämpöpumpun SPF (tila)-luvut lämmityspiirin menoveden lämpötilan funktiona säävyöhykkeellä 4.