

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Omakotitalon keskuslämmitysjärjestelmän suunnittelu

Planning of a detached house heating system

Työn tarkastaja: Tero Tynjälä

Työn ohjaaja: Tero Tynjälä

Lappeenranta 10.4.2019

Juha Vahvanen

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Juha Vahvanen

Opinnäytteen nimi: Omakotitalon keskuslämmitysjärjestelmän suunnittelu

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Tero Tynjälä

Kandidaatintyö 2019

Numeroitujen 26 sivua, 3 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: keskuslämmitys, omakotitalo, maalämpöpumppu, hakelämmitys

Tässä kandidaatintyössä suunnitellaan vuonna 1900 rakennetulle ja vuonna 1986 peruskorjatulle omakotitalolle uusi keskuslämmitysjärjestelmä. Talossa on ollut tähän asti hakelämmitys. Uusi lämmitysjärjestelmä on tarpeellinen, sillä nykyisen hakekattilan ja lämminvesivaraajan tekninen käyttöikä on lopussa vakavien korroosiovaurioiden vuoksi.

Suunnittelussa määritetään rakennuksen lämmöntarve sekä lämmitysjärjestelmän tehontarve, käydään läpi uudet lämmitysjärjestelmävaihtoehdot ja vertaillaan niitä teknisten, taloudellisten ja ympäristöllisten näkökulmien kannalta. Päävaihtoehtoina suunnittelussa on nykyisen lämmitysjärjestelmän korvaaminen joko uudella, modernisoidulla hakelämmitysjärjestelmällä tai maalämpöpumpulla. Suunnittelusta on jätetty pois uusiutumattomat energianlähteet ja suora sähkölämmitys. Tärkeimmät valintakriteerit lämmitysjärjestelmälle ovat hankintahinta, käyttökustannukset sekä käyttö- ja huoltovarmuus.

Määritetyn lämmöntarpeen ja tarvittavan lämmitystehon perusteella saatiin vertailtavaksi erilaisia lämmitysratkaisuja. Hakelämmitysjärjestelmät todettiin liian kalliiksi sekä monimutkaisiksi verrattuina maalämpöpumppuun. Lämpöpumppua puolsi myös asennuksen vaivattomuus ja nopeus. Maalämpöpumpun invertterikäytöllä saavutetaan etuja energiansäästössä ja komponenttien pidentyneessä käyttöiässä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä	2
Sisällysluettelo	3
Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Vanhan lämmitysjärjestelmän kuvaus	8
3 Lämmitysjärjestelmän suunnittelu	10
3.1 Rakennuksen energiantarpeen määrittäminen	10
4 Lämmitysvaihtoehtojen vertailu	17
4.1 Maalämpöjärjestelmät	17
4.2 Hakelämmitysjärjestelmät	19
5 Lämmitysratkaisun valinta	22
6 Yhteenveto	24
Lähdeluettelo	25

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	[m ²]
c	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
L	pituus, paksuus	[m]
k	lämmönjohtavuus	[W/m ² K]
k	käyttöaste	[-]
n_{50}	rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa:n paine-erolla	[1/h]
P	teho	[W]
P	ominaislämpökuorma	[W/m ²]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
q_{50}	rakennusvaipan ilmanvuotoluku	[m ³ /(hm ²)]
Q	lämpöenergia, lämpöteho	[kWh, W]
R	lämmönvastus	[Km ² /W]
T	lämpötila	[°C, K]
t	käyttöaika	[s, h]
U	lämmönläpäisyyluku	[W/m ² K]
V	tilavuus	[m ³]

Kreikkalaiset aakkoset

Δ	muutos	[-]
η	hyötysuhde	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

i	ilma
kv	kylmä käyttövesi
lkv	lämmin käyttövesi
rakosa	rakennusosa
s	sisä
t	lämpö
u	ulko

v vesi

Lyhenteet

COP coefficient of performance, tehokerroin

1 JOHDANTO

Suomen olosuhteissa asuntojen lämmittäminen on merkittävimpiä energiankäytön kohteita. Vuonna 2015 asuntojen lämmittämiseen käytettiin energiaa noin 41 TWh, mikä kattaa 25 % energian vuosittaisesta kulutuksesta. Lämmitysenergia muodostaa täten merkittävän osan asumisen kustannuksista ja ympäristövaikutuksista Vertailun vuoksi liikenteen energiankulutus oli samana ajanjaksona 15 % kokonaisenergiankulutuksesta (Suomen virallinen tilasto 2016a.).

Pääasialliset lämmitysmuodot taajama-alueiden ulkopuolisissa pientaloissa ovat puulämmitys ja suora sähkölämmitys. Uusissa rakennuksissa puolestaan lämmitysmuodoksi valitaan useimmiten maalämpöpumppu. Vuonna 2015 valmistuneissa uusissa pientaloissa jo 37,5 %:ssa lämmitystavaksi valittiin maalämpö. (Suomen virallinen tilasto 2016b.)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on suunnitella puurakenteiseen omakotitaloon uusi lämmitysjärjestelmä. Rakennus on vuonna 1900 valmistunut puutalo, joka on peruskorjattu vuonna 1986. Rakennuksessa on ollut peruskorjaukseen asti uunilämmitys ja peruskorjauksen jälkeen vesikiertoinen haketta polttoaineenaan käyttävä keskuslämmitys sekä leivinuuni. Hakelämmitysjärjestelmä polttoainevarastoineen, kattiloineen ja varaajineen on sijoitettu parinkymmenen metrin päähän asuinrakennuksesta sijaitsevaan vanhaan navettarakennukseen, jossa sijaitsee nykyään korjaamo- ja varastotiloja sekä kausityöntekijöiden pesutiloja. Lämmitysjärjestelmän uudistaminen on ajankohtaista, sillä sekä hakekattilassa että lämminvesivaraajassa on korroosiovaurioita ja niitä on jouduttu korjaamaan syöpymisvaurioiden takia. On odotettavissa, että edellä mainittujen komponenttien tekninen käyttöikä alkaa olla loppuillaan eikä talon lämmittämistä voida toteuttaa vanhalla järjestelmällä enää riittävän luotettavasti.

Järjestelmäsuunnittelussa perehdytään ensin vanhan lämmitysjärjestelmään, jonka jälkeen määritellään uuden järjestelmän vaatimukset ja laaditaan suuntaa antava mitoituslaskelma. Eri järjestelmävaihtoehtoja vertaillaan ja valitaan parhaaksi

osoittautuva vaihtoehto. Lopuksi kerrotaan järjestelmäratkaisun toteutuksesta ja käyttöönotosta ja analysoidaan valinnan onnistumista.

Työssä tarkastellaan eri lämmitysvaihtoehtoja sekä niiden kannattavuutta. Tarkastelussa on vanhan järjestelmän korvaaminen uudella, modernilla hakelämmitysjärjestelmällä tai maalämpöpumpulla sillä asuinrakennuksessa on jo olemassa vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä. Suora sähkölämmitys sekä uusiutumattomat polttoaineet on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Valinnassa painotetaan paitsi investointi- ja käyttökustannuksia, myös käytön ja kunnossapidon helppoutta ja toimintavarmuutta.

2 VANHAN LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN KUVAUS

Olemassa oleva vanha lämmitysjärjestelmä käyttää polttoaineenaan metsähaketta, jota poltetaan Arimax 35 -merkkisessä luonnonvetoisessa alapalokattilassa (kuva 1). Kattilassa ei ole erillistä syöttölaitteistoa, vaan hake syötetään rakennuksen yläkerrasta manuaalisesti syöttötorvea pitkin. Syöttötorven yläpää on ilmatiiviillä luukulla suljettu ja tila on paloturvallisesti eristetty hakevarastosta. Arinalla oleva vinopelti ohjaa hakkeen oikeaan kohtaan arinalle. Termostaattiohjattu kiertopumppu kierrättää vettä kattilasta 4000 litran lämminvesivaraajaan. Lämminvesivaraajassa on ollut alun perin kolme kuparista lämmönsiirrintä, mutta tällä hetkellä enää yksi niistä on toimiva. Lämminvesivaraajasta lämpö siirtyy lämpöputkea pitkin asuinrakennuksen vesikiertoiseen lämmönjakojärjestelmään.



Kuva 1. Arimax 35-merkinen kattila ja polttoaineensyöttötorvi.

Vanhan hakelämmitysjärjestelmän lämmitys alkaa käsin toteutettavalla tuhkan poistolla ja lämpöpintojen nuohouksella. Tämän jälkeen kattila ja polttoaineen syöttötorvi täytetään hakkeella yläkerran latauhuoneesta käsin. Seuraavana tapahtuu sytytys nestekaasupoltinta käyttäen. Polttoainetta täytyy yleensä lisätä lämmityksen aikana 1-2 kertaan ja palamisen aikana kattilaa täytyy silloin tällöin käydä valvomassa turvallisuussyistä. Riskejä aiheuttavat mm. vesikierron häiriöistä tai vuodoista johtuvasta vedenpuutteesta johtuva kiehuminen ja ylikuumeneminen, palokaasujen epätasaisesta palamisesta johtuvat räjähdykset ja paineiskut sekä savun pääsy kattilahuoneeseen, nokipalot sekä vedon häiriöt.

Lämmönjakotapana on rakennuksessa pääasiassa patterilämmitys, mutta uudessa vuonna 1986 valmistuneessa siipiosassa lämmönjako tapahtuu lämpimän käyttöveden kiertoon liitettyllä lattialämmityksellä. Tämä oli 1980-luvulla vallinnut tapa sillä suljettua lattialämmityskiertoa ei voitu tehdä happidiffuusion estävien putkien puuttumisen takia.

Lämmönjakoverkostossa ei ole havaittu merkittäviä vikoja tai puutteita, jotka aiheuttaisivat uudistuksien tarvetta. Sen sijaan kattilassa on havaittu vesivuotoja. Vuodot ovat olleet siinä määrin merkittäviä, että kattila on täytynyt irtikytkeä ja vuotoja on pitänyt paikata hitsaamalla. Yksittäisten syöpymien paikkaamisen lisäksi kattilan pohjaan on hitsattu uusi pohjalevy vanhan syöpyneen levyn päälle. Myös teräksisessä lämminvesivaraajassa on ollut merkittäviä vuotoja, joita on paikattu hitsaamalla. Lämminvesivaraaja on sijoitettu kattilahuoneessa siten, että vain kaksi sen seinistä on näkyvissä ja vuodot ovat korjattavissa vain näistä osista. Muilta osilta varaajasäiliön kunnosta ei ole tarkkaa tietoa, mutta oletettavissa on, että varaajan kunto on välttävä.

Uutta lämmitysjärjestelmää pohdittaessa täytyy miettiä myös lämmitystyön helppoutta ja siihen kuluva aikaa. Manuaalisyyttöinen hakelämmitys vaatii lämmittäjältä aikaa ja vaivaa. Kattila on kertalämmitettävää tyyppiä, eli kattilassa on tulet vain silloin tällöin, suuren varaajan ansiosta lämmitys toteutetaan talvella keskimäärin joka toinen päivä, kesällä harvemmin, noin 1-2 kertaa viikossa. Kesällä lämmitystarvetta lisää toisaalta noin 20 kausityöntekijän lämpimän käyttöveden tarve.

3 LÄMMITYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Tässä luvussa määritetään rakennuksen energiantarve, jonka perusteella voidaan aloittaa järjestelmäratkaisujen valinta sekä eri järjestelmien hintojen vertailu. Rakennuksen energiantarpeen määrittämisessä käytetään Suomen rakennusmääräyskokoelman osia D5, D3, D2 ja C4 rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta, eristyksestä ja ilmanvaihdosta sekä laitevalmistajien käyttämiä mitoitusarvioita.

3.1 Rakennuksen energiantarpeen määrittäminen

Lämmitysjärjestelmän suunnittelua varten on määritettävä rakennuksen vuotuinen energiantarve ja tarvittava järjestelmän huipputeho. Energiantarpeen määrittämisessä käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelmaa D5 soveltuvin osin. Rakennuksen lämmitysenergiantarve koostuu sisäilman lämmitykseen tarvittavasta energiasta ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittavasta energiasta.

Kyseessä oleva rakennus on säävyöhykkeellä II. Laskelmissa on käytetty mitoittavana sisäilman lämpötilana 22 °C ja minimiulkolämpötilana –29 °C. Maanvastaisten osien lämpötekniisessä laskennassa oletettiin maan lämpötilan olevan 5 astetta korkeampi kuin ilman lämpötila (Ympäristöministeriö 2012a).

Sisäilman lämmitykseen tarvittavan energiamäärän laskenta aloitetaan määrittämällä seinien, yläpohjan ja alapohjan rakenteelliset ominaisuudet ja laskemalla niiden läpi johtuvan lämpövirran suuruus. Johtuminen oletetaan yksidimensionaaliseksi stationaariseksi johtumiseksi. Seinien ja ylä- sekä alapohjan rakenteelliset ominaisuudet on määritetty vuoden 1986 rakennusmuistiinpanojen perusteella. Rakennekuvaukset on eritelty liitteessä 1. Rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuslukuina lämmönvastusten laskennassa on käytetty rakennusmääräyskokoelman C4 arvoja (Ympäristöministeriö 2003a).

Kun rakennusmateriaalit ja niiden paksuudet tiedetään, voidaan seinille sekä ala- ja yläpohjalle määrittää lämmönläpäisyyluku eli U -arvo. U -arvo määritellään rakenneosien lämmönvastusten avulla yhtälössä (1) (Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine 2007, 101):

$$U = \frac{1}{\sum R_t} \quad (1)$$

jossa R_i on rakennusmateriaalikerroksen lämmönvastus [Km²/W]

Lämmönvastukset määritellään materiaalin lämmönjohtavuuden ja materiaalipaksuuden avulla yhtälön (2) mukaan (Incropera et al. 2007, 97):

$$R = \frac{L}{k} \quad (2)$$

jossa L on rakennusmateriaalikerroksen paksuus [m]
 k on ko. kerroksen lämmönjohtavuus [W/m² K]

Kun rakenneosien U -arvot on määritelty, lasketaan johtumislämpöhäviöt kunkin rakenneosan läpi erikseen yhtälön (3) mukaisesti (Ympäristöministeriö 2012a, 16):

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (3)$$

jossa Q_{rakosa} on rakennusosan johtumislämpöhäviö [kWh]
 U_i on rakennusosan i lämmönläpäisykerroin [W/m²K]
 A_i on rakennusosan i pinta-ala [m²]
 T_s on sisäilman lämpötila [°C]
 T_u on ulkoilman lämpötila [°C]
 Δt on ajanjakson pituus [h]
 1000 on yksikkömuunnoskerroin kilowattitunneiksi

Rakennusosien johtumislämpöhäviöt on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Rakennuksen johtumislämpövirrat rakenneosien läpi.

	Pinta-ala [m ²]	U-arvo [W/m ² K]	Johtumislämpövirta 1 [W]	Johtumislämpövirta 2 [W]
Tuparakennuksen ulkoseinä	103	0,22	407,9	1155,7
Siipirakennuksen ulkoseinä	47	0,25	211,5	599,3
Tuvan alapohja	130	0,22	371,8	1315,6
Siiven alapohja	40	0,25	130	460
Yläpohja	170	0,12	367,2	1040,4
Ikkunat ja ovet	19	1,00	342	969
Yhteensä			1830,4	5539,9

Rakennusmääräyskokoelman D5 perusteella (Ympäristöministeriö 2012a, 19) voidaan laskea rakennuksen epätiiviyden aiheuttaman vuotoilman lämpenemisen energiantarve. Vuotoilman määrä voidaan laskea rakennusvaipan pinta-alan avulla yhtälöllä (4).

$$q_{v,vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600 \cdot x} A_{vaiippa} \quad (4)$$

jossa	$q_{v,vuotoilma}$	vuotoilmavirta	[m ³ /s]
	q_{50}	rakennusvaipan ilmanvuotoluku	[m ³ / (h m ²)]
	$A_{vaiippa}$	rakennusvaipan pinta-ala ml. alapohja	[m ²]
	x	kerroin, yksikerroksisille rakennuksille	35
	3600	ilmavirran muuntokerroin yksikköön	m ³ /s

Rakennusvaipan ilmanvuotoluku voidaan määrittää seuraavasti yhtälöllä (5) (Ympäristöministeriö 2012a, 19):

$$q_{50} = \frac{n_{50}}{A_{vaiippa}} V \quad (5)$$

jossa	q_{50}	rakennusvaipan ilmanvuotoluku, [$\text{m}^3/(\text{h m}^2)$]
	n_{50}	rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa:n paine-erolla, [1/h]
	V	rakennuksen tilavuus, [m^3]
	A_{vaippa}	rakennusvaipan pinta-ala ml. alapohja, m^2

Rakennusmääräyskokoelman D5 (Ympäristöministeriö 2012a, 20) mukaan rakennuksen ilmanvuotolukuna n_{50} on käytetty arvoa 3 1/h. Tällöin rakennusvaipan ilmanvuotoluvuksi q_{50} saadaan yhtälön (5) mukaan 2,65.

Sijoittamalla rakennusvaipan ilmanvuotoluku q_{50} yhtälöön (4) vuotoilmavirraksi saadaan $0,0107 \text{ m}^3/\text{s}$.

Kun vuotoilmavirta tiedetään, voidaan laskea vuotoilman lämmittämiseen vaadittava energiamäärä yhtälön (6) avulla (Ympäristöministeriö 2012a):

$$Q_{\text{vuotoilma}} = \rho_i c_{pi} q_{v,\text{vuotoilma}} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (6)$$

jossa	$Q_{\text{vuotoilma}}$	vuotoilman lämpenemisen energiantarve	[kWh]
	ρ_i	ilman tiheys, $1,2 \text{ kg/m}^3$	
	c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, $1000 \text{ J}/(\text{kg K})$	
	$q_{v,\text{vuotoilma}}$	vuotoilmavirta	[m^3/s]
	T_s	sisäilman lämpötila,	[$^{\circ}\text{C}$]
	T_u	ulkoilman lämpötila	[$^{\circ}\text{C}$]
	Δt	ajanjakson pituus	[h]
	1000	yksikkömuunnoskerroin kilowattitunneiksi	

Vuotoilmavirran lämmitykseen tarvittava energia on siten 2028 kWh.

Rakennuksessa ei ole käytössä koneellista ilmanvaihtoa. Ilmanvaihto toteutetaan käytännössä ikkunoiden kautta tuulettamalla ja painovoimaisesti sauna- ja pesutiloista ilmanvaihtohormin kautta. Painovoimaisen ilmanvaihdon vaatima lisälämmitysenergiatarve arvioidaan seuraavasti: Rakennusmääräyskokoelman osan D2

(Ympäristöministeriö 2003b) mukaan riittävä korvausilmavirta on 6 kuutiodesimetriä/henkilö/sekunti, kun kyseessä on asuinrakennus. 4-5 hengen jatkuvaa oleskelua varten riittävä ilmavirta olisi täten 24-30 litraa sekunnissa. Mikäli tarkastellaan peruskorjauksen aikaista rakentamismääräyskokoelmaa (Sisäasiainministeriö 1978, 3) minimitaso ilmanvaihdon korvausilmamäärälle on vastaavalla henkilömitoituksella noin puolet siitä. Tehdyssä laskelmassa on oletettu korvausilmavirraksi 18 litraa sekunnissa.

Korvausilman lämpenemiseen tarvittava energiamäärä lasketaan seuraavasti yhtälöllä (7):

$$Q_{korvausilma} = \rho_i c_{pi} q_{v, korvausilma} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (7)$$

jossa	$Q_{korvausilma}$	korvausilman lämpenemisen energiantarve	[kWh]
	ρ_i	ilman tiheys, 1,2 kg/m ³	
	c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/ (kg K)	
	$q_{v, korvausilma}$	korvausilmavirta	[m ³ /s]
	T_s	sisäilman lämpötila	[°C]
	T_u	ulkoilman lämpötila	[°C]
	Δt	ajanjakson pituus	[h]
	1000	yksikkömuunnoskerroin kilowattitunneiksi	

Korvausilman lämmittämiseen kulunut energiamäärä on 7720 kWh/a.

Rakennuksen lämmitysenergian tarvetta määrittäessä on huomioitava myös valaistuksesta, sähkölaitteista sekä henkilöistä aiheutuvat lämpökuormat. Lämpökuormat lasketaan neliömetriperusteisesti rakennusmääräyskokoelman D3 mukaan yhtälöllä (8). Valaistuksen lämpökuormaksi oletetaan 8 W/m², sähkölaitteiden 3 W/m² ja henkilöiden 2 W/m². Käyttöaste on 0,6. (Ympäristöministeriö 2012b, 19)

$$Q = kPA \frac{8760}{1000} \quad (8)$$

jossa	k	käyttöaste	[-]
-------	-----	------------	-----

P	ominaislämpökuorma	[W/m ²]
A	huonepinta-ala	[m ²]

Lämpökuorma eli lämmitystarvetta vähentävä lämpöteho on 1236 W. Vuodessa tämä säästää lämmitysenergiaa 11616 kWh.

Kun lasketaan rakennuksen laskennallisen lämmitysenergiantarpeen ja lämpökuormien summa energiavirtojen suunta huomioiden, saadaan rakennuksen tilalämmityksen nettolämmitysenergiantarpeeksi noin 19000 kWh.

Lämpimän käyttöveden vaatiman lämmitysenergiantarpeen laskennassa on oletettu lämpimän käyttöveden vuorokausikulutukseksi 200 litraa ja kylmän ja kuuman käyttöveden lämpötilaeroksi 50 celsiusastetta. Tarvittava energiamäärä lasketaan rakennusmääräyskokoelma D5:n mukaan seuraavasti (Ympäristöministeriö 2012a, 24):

$$Q_{lkv,netto} = \rho_v c_{pv} V_{lkv} (T_{lkv} - T_{kv}) / 3600$$

jossa	$Q_{lkv,netto}$	lämpimän käyttöveden lämpöenergian nettotarve	[kWh]
	ρ_v	veden tiheys, 1000 kg/m ³	
	c_{pv}	veden ominaislämpökapasiteetti, 4200 J/ (kg K)	
	V_{lkv}	lämpimän käyttöveden kulutus	[m ³]
	T_{lkv}	lämpimän käyttöveden lämpötila	[°C]
	T_{kv}	kylmän käyttöveden lämpötila	[°C]

Käyttöveden vuotuinen lämmitysenergiantarve on noin 4300 kWh. Vuoden 8760 tunnille jaettuna tämä merkitsee keskimäärin 490 watin lämmitystehoa.

Kun edellä lasketut lämpöhäviöt lasketaan hetkellisen tehontarpeen näkökulmasta käyttäen ulkoilman lämpötilana mitoituslämpötilaa, joka on -29 celsiusastetta, saadaan selville lämmitysjärjestelmän tarvittava maksimiteho. Mitoituslämpötila on säävyöhykkeen perusteella määräytyvä lämpötila, jonka alle lämpötila laskee vain poikkeuksellisesti (Ilmatieteen laitos 2018). Mikäli ulkoilman lämpötila laskee alle

mitoituslämpötilan, tilojen lämpötilan pitäminen suunnitellussa arvossa vaatii lisälämmitystä kuten sähköpatteria tai leivinuunia, mikäli tehoreserviä ei ole käytettävissä. Lämmitysjärjestelmän maksimitehontarve on 7,9 kW. Lämpövirrat ja niiden vaatimat maksimilämpötehot on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Lämpövirrat ja maksimilämpötehot.

Johtumislämpöhäviö vuodessa	16034	kWh
Johtumislämpöteho enimmillään	5540	W
Vuotoilman lämmitystarve	2028	kWh
Vuotoilman lämmityksen huipputeho	656	W
Korvausilman lämmitystarve	7720	kWh
Korvausilman lämmityksen huipputeho	2497	W
Lämpökuormien keskiteho	1326	W
Lämpökuormien vuotuinen energia	11616	kWh
Nettolämmitysenergiantarve	14166	kWh
Tilalämmityksen mitoittava huipputeho	7367	W
Käyttöveden lämmitysenergiantarve	4258	kWh
Käyttöveden lämmitysteho	486	W
Lämmitysjärjestelmän maksimiteho	7853	W
Lämmitysenergian vuositarve	18424	kWh

4 LÄMMITYSVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

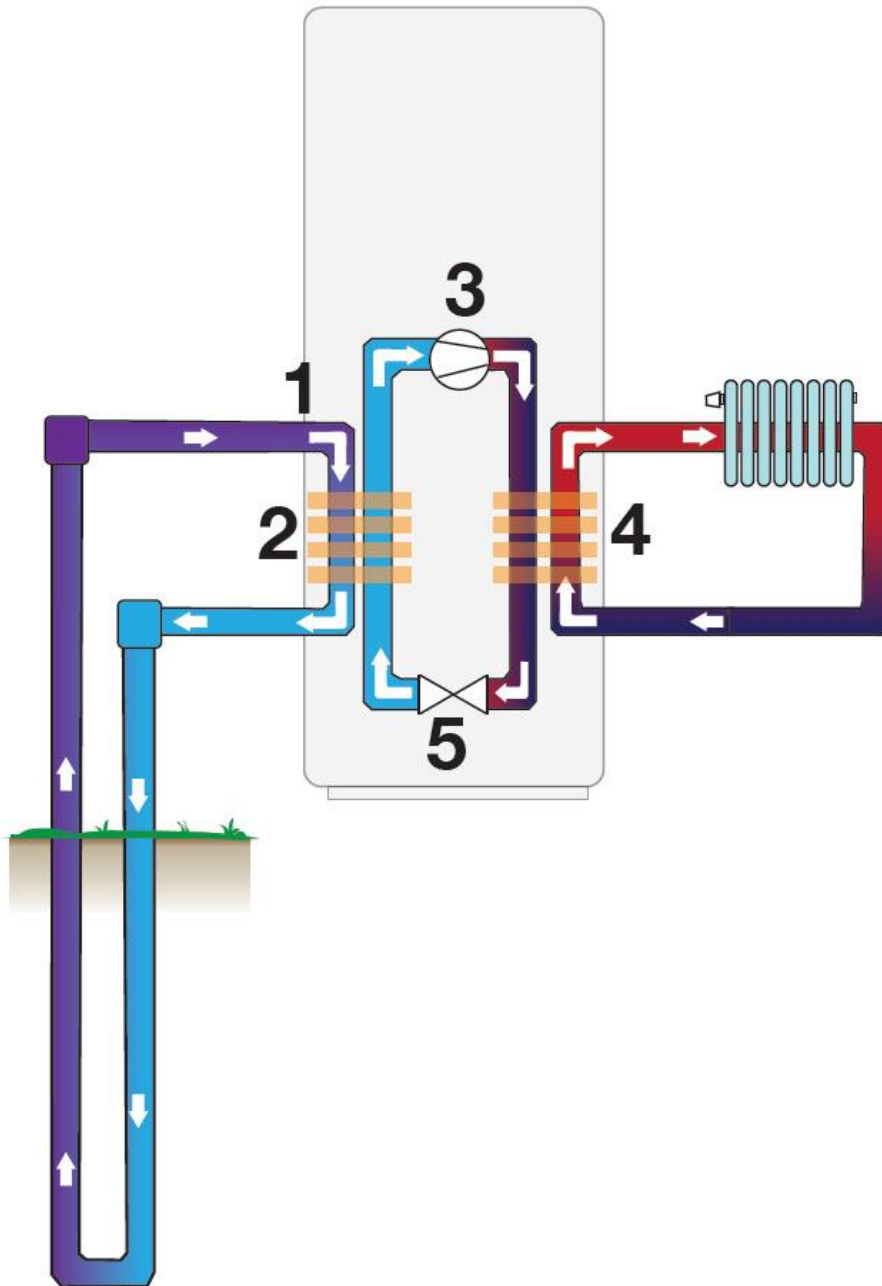
Määritetyn energiantarpeen ja huipputehon perusteella voidaan vertailla soveltuvia lämmitysratkaisuja. Tarkasteltavana ovat maalämpöjärjestelmät ja automatisoidut hakelämmitysjärjestelmät.

4.1 Maalämpöjärjestelmät

Lämpöpumppu on lämpövoimakone, joka siirtää lämpöä alemman lämmöntuontilämpötilan tasosta korkeampaan lämmönpoistolämpötilaan. Tähän tarvitaan mekaanista työtä, joka on kuitenkin vain pieni osa lämpöpumpun tuottamasta lämpöenergiasta. Samanlaiseen toimintaperiaatteeseen perustuu myös esimerkiksi kylmäkoneiden toiminta, mutta niissä lämpötilatasot ovat päinvastaiset lämpöpumppuun verrattuna. (Dincer & Rosen 2007, 91)

Lämpöpumpun tärkeimmät toiminnalliset komponentit ovat termodynaamista työtä tekevä kompressori, lämpimällä puolella oleva lauhdutin, kylmän puolen höyrystin sekä paisuntaventtiili. Lämpöpumppuprosessi on lämmönvaihtimien kautta yhteydessä sekä maahan sijoitettuun lämmönkeruupiiriin sekä tiloja ja käyttöväettä lämmittävään lämmönjakopiiriin. Lämmönkeruupiirissä kiertävän vesi-alkoholiseoksen maasta mukanaan tuomalla lämmöllä prosessin kylmäaine höyrystyy höyrystimessä. Kompressorin avulla höyryn lämpötila ja paine kasvavat. Lauhduttimessa kuuma, jopa sata-asteinen höyry lauhtuu ja luovuttaa lämpöä lämmönjakoverkoston. Nestemäiseksi muuttuneen kylmäaineen paine alenee paisuntaventtiilissä ja lämpötila laskee uudelleen noin -10 celsiusasteeseen ennen höyrystimeen palaamista. (Motiva 2012)

Lämpöpumppuprosessin periaatekuva ja kytkennät sekä lämmönkeru- että lämmönjakopiireihin on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Maalämpöpumpputjärjestelmän periaatekuva (Pekkala 2012).

Maalämpöpumpun hyötysuhdetta mitataan tehokertoimella (COP, coefficient of performance). COP lasketaan lämpöpumpun tuottaman lämpöenergian ja sen käyttämän sähköenergian suhteena. (Reay & MacMichael 1979, 13)

Maalämpöjärjestelmän hyödyntämä lämpö on yleensä maaperän pintakerrokseen varastoitunutta aurinkoenergiaa. Joissain syvien lämpökaivojen tapauksessa

lämpöenergia voi olla peräisin myös maaperässä olevien radioaktiivisten aineiden hajoamisesta. Maaperän keskilämpötila on 2–3 celsiusastetta lämpimämpi kuin ilman keskilämpötila. Ilman lämpötila vaikuttaa maaperän lämpötilaan pintakerrosten osalta, mutta syvemmällä maassa lämpötila on likimain vakio. (Juvonen & Lapinlampi 2013, 7)

Maalämpöjärjestelmistä saatiin neljä tarjousta. Lämpöpumppujärjestelmien tehot vaihtelivat välillä 8–16 kW ja hinnat välillä 18 300–20 805 €. Hinnan vaihtelua selittää pääasiassa eri lämpöpumppujen vaatimat eri syvyiset energiakaivot. Lämpöpumppujen varustelutasossa oli myös vaihtelua: kaksi pumpuista oli taajuusmuuttajaohjattuja ja kaksi oli pehmökäynnistimellä varustettuja suorakäyntisiä pumppuja.

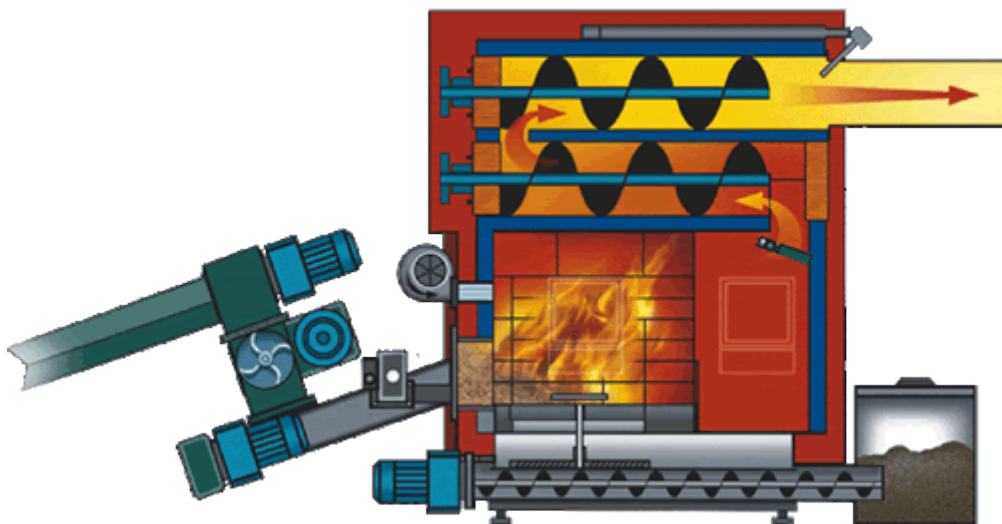
Taajuusmuuttajaohjatut kompressorit edustavat selvästi edistyneempää uuden sukupolven teknologiaa lämpöpumpuissa. Taajuusmuuttajakäyttö mahdollistaa lämpöpumpun portaattoman säädön kulloinkin vallitsevan kuormituksen mukaiseksi ilman muita säätöjärjestelmiä. Osakuormakäyttö on täten energiatehokkaampaa kuin perinteisellä kolmivaihemootorilla käytetyllä kompressorilla. Lisäksi taajuusmuuttajakäyttö säästää energiaa erityisesti kylmähöyryprosessien ohjauksessa tasaamalla lämpötilaeroja höyrystimen ja lauhtuttimen välillä sekä pidentämällä yhtäjaksoisia käyttöaikoja. Energiansäästö voi olla jopa 25–30 %. Käynnistysten ja sammutusten määrän väheneminen ja tasaisempi yhtäjaksoinen kuormitus säästää moottorin ja kompressorin sähköisiä ja mekaanisia osia pidentäen niiden käyttöikää. (de Almeida, Ferreira & Both 2005.)

Maalämpöpumpun vuotuinen käyttökustannus koostuu lähes yksinomaan pumpun käyttämän sähkön hinnasta. Vuotuisen lämmöntarpeen ollessa noin 18 500 kWh ja COP:n ollessa 4,85 tulee maalämpöpumpun vuotuiseksi sähkönkulutukseksi noin 3 800 kWh vuodessa. Kun sähkön hinnaksi siirtomaksuineen ja veroineen oletetaan 0,125 €/kWh, saadaan vuotuiseksi käyttökustannukseksi noin 480 euroa.

4.2 Hakelämmitysjärjestelmät

Hakelämmitysjärjestelmä koostuu kattilasta, polttoaineen syöttölaitteistosta ja kuljettimista, ilma- ja savukaasujärjestelmistä sekä lämpövaraajasta. Kuvassa 3 on

esitetty tyypillinen moderni hakelämmityslaitteisto tärkeimpine komponentteineen (Heizomat Gerätebau-Energiesysteme GmbH 2019)



Kuva 3. Heizomat HSK-RA- hakelämmityskattilan periaatekuva.

Kuvan vasemmassa reunassa olevaa vihreää torvea pitkin hake syötetään kattilaa kohti. Polttoaineen syöttö varastosta tapahtuu useimmiten jousipurkaimella, joka syöttää haketta kuljetinruuveille. Hake kulkee ennen viimeistä kattilalle johtavaa syöttöruuvia sulkusyöttimen läpi, joka murskaa suurimmat tikut ja ylisuuret hakkeen palaset, jotta ne eivät tukkisi polttoaineensyöttöjärjestelmää. Sulkusyötin toimii samalla takapalon estäjänä polttoaineen syötössä. Takapalo on vaarallinen tila, jossa tuli pääsee leviämään kattilasta polttoainekuljetinta pitkin kohti hakevarastoa ja voi pahimmillaan aiheuttaa vakavan tulipalon, mikäli palo pääsee hakevarastoon tai palamis kaasut räjähtävät laitteistossa. Sulkusyöttimen jälkeen hake syötetään kattilan arinalle ruuvikuljetinta käyttäen. Kattilan suulla oleva primääri-ilmapuhallin puhaltaa kattilaan tarvittavan paloilmän. Kattila on varustettu myös automaattisella sytytysjärjestelmällä, joka sytyttää hakkeen tarvittaessa sähkökäyttöisen hehkutulpan avulla. Muuratusta tulipesästä kuumat savukaasut kulkevat lämpöpintojen läpi luovuttaen lämpöä niissä kiertävään kattilaveteen poistuen jäähtyneenä savuhormiin. Kattilavesi kulkee edelleen lämminvesivaraajaan lämmönsiirrinten kautta, josta lämpöä luovutetaan edelleen lämmönjakoverkostoon. Palamisessa muodostuva tuhka putoaa arinan läpi tuhkakuljettimelle, joka kerää muodostuneen tuhkan konttiin, josta se voidaan tyhjentää säännöllisin väliajoin. Modernit kattilat on varustettu lämpötila- ja lambda-antureilla, joiden tehtävä on ohjata

polttoaineen ja palamisilman syöttöä sekä automaattisella lämpöpintojen nuohouksella, joka pitää lämpöpinnat puhtaana ja lämmönsiirron lämpöpinnoilta hyvänä.

Automatisoidun hakelämmitysjärjestelmän asentaminen esimerkkikohteeseen osoittautuisi erittäin haastavaksi, sillä polttoainevarastona toimiva tila sijaitsee vanhan navettarakennuksen yläkerrassa ja kattilahuone kerrosta alempana. Syöttölaitteistoksi ei täten kelpaisi standardin mukainen laitteisto, vaan vaadittaisiin useita kuljettimia, jotta haketta pystyttäisiin siirtämään useiden mutkien ja pudotusten kautta kattilalle. Myös kuljettimien toimintavarmuus ja huoltovarmuus saattaisivat kärsiä. Lisäksi paloturvallisuudelle aiheutuisi haasteita, koska olemassa oleviin palonkestäviin tiiviisiin rakenteisiin pitäisi tehdä läpivientejä, jotta kuljettimien asennus onnistuisi.

Hakelämmitysjärjestelmien maahantuojille suoritettujen alustavien kyselyjen perusteella toivotunlaisen lämmitysjärjestelmän investointikustannus olisi verollisena noin 25 000–30 000 euroa sisältäen kattilan, varaajan sekä syöttölaitteiston. Tämän hinnan päälle tulisivat vielä tarvittavat rakenteelliset muutos- ja asennustyöt, jotka lisäisivät järjestelmän hintaa entisestään.

Hakelämmitysjärjestelmän polttoainekustannus vuositasolla voidaan arvioida noin 18 500 kWh:n lämmöntarpeen avulla seuraavasti: Mikäli lämmitysjärjestelmän kokonaishyötysuhde on 0,8 tulee tarvittavaksi lämmitysenergian määräksi noin 23 000 kWh. Kun oletetaan hakepuun korjuu-, kuljetus-, haketus- ja käsittelykustannuksille hinta 21 €/MWh (Tilastokeskus 2019), saadaan vuotuiseksi polttoainekustannukseksi noin 460 euroa, jotka ovat lähes arvioidut maalämpöjärjestelmän kokonaisvuosikustannukset. Vuotuisia kustannuksia lisää myös huolto- ja kunnossapitokustannukset, jotka ovat maalämpöjärjestelmää suuremmat.

Teknisen ja taloudellisen vertailun perusteella tässä vaiheessa voidaan sulkea pois hakelämmitysjärjestelmät teknisen monimutkaisuutensa ja kalliin investointikustannuksen perusteella. Lämmitysjärjestelmäksi valitaan lämpöpumppu, ja lopullinen valinta tehdään erityyppisten lämpöpumppujen välillä.

Mikäli järjestelmän lämmöntarve olisi ollut suurempi, tällöin hakeämmitysjärjestelmä olisi voinut olla kilpailukykyinen vaihtoehto, sillä hakekattiloiden hinnat eivät juuri nouse niiden lämpötehon noustessa 20 kW:sta aina 80 kW:iin asti. Tällöin lämpöenergian tuotannon yksikkökustannus olisi huomattavasti pienempi hakeämmityksellä.

5 LÄMMITYSRATKAISUN VALINTA

Maalämpöpumpuista pyydettiin tarjouksia kahdelta eri jälleenmyyjältä ja neljästä eri lämpöpumpusta. Saadut tarjoukset olennaisine spesifikaatioineen on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Lämpöpumpuvaihtoehtojen tarjoustiedot koottuna.

Lämpöpumppu	Nimellisteho	COP EN 14511	Kokonaishinta	Käyttötapa	Vaadittu kaivon syvyys
Diplomat Inverter	17 kW	4,67	20 805 €	invertteri	180m
NIBE F-1255	16 kW	4,85	18 300 €	invertteri	200 m
Diplomat Optimum	8 kW	3,32	18 696 €	suoraveto	180m
AlphaInnotec PWZS Nordic	9,3 kW	3,3	18 900 €	suoraveto	200 m

Lämmitysjärjestelmän valinnassa päädyttiin ruotsalaisen Nibe Industrin valmistamaan invertterikäyttöiseen Nibe F1255-16 -lämpöpumppuun. Niben lämpöpumppuratkaisu oli hankintahinnaltaan kilpailukykyinen ja standardin mukaiselta tehokertoimeltaan paras vaihtoehtoista. Invertterikäyttönsä perusteella Niben lämpöpumppu edusti selkeästi parasta saatavilla olevaa teknologiaa. Invertterikäyttö mahdollistaa pumpun osakuormajon minimoiden käynnistysten ja sammuttamisten määrän, minkä oletetaan pidentävän kompressorin ja sähkömoottorin käyttöikää sekä pienentävän käynnistysten aiheuttamia tehopiikkejä ja jännitteen hetkellisiä alenemisiä. Lisäksi Niben pumppuratkaisu on rakennuksen lämmöntarpeeseen nähden reilusti mitoitettu, joten lisälämpöä ei tarvita

kovillakaan pakkasilla ja myös lisälämpökuorman (esimerkiksi piharakennuksen) lisääminen lämpöpumpun lämmitettäväksi on mahdollista. Lämpöpumpulle myönnettiin 6 vuoden takuu.

6 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin keskuslämmitysjärjestelmä 1900-luvun alun puutaloon. Suunnittelun lähtökohtana oli 1980-luvulla toteutetun peruskorjauksen rakennemuistiinpanot, joiden perusteella aloitettiin määrittämään rakennuksen lämmitysenergian ja -tehon tarvetta. Laskentaohjeena käytettiin Suomen rakentamismääräyskokoelmaa soveltuvin osin.

Rakennuksen lämmitysenergiatarpeeksi saatiin 18 400 kWh vuodessa ja järjestelmän maksimitehontarpeeksi 7,9 kW. Saatujen tulosten perusteella kartoitettiin rakennukseen parhaiten sopivia lämmitysratkaisuja. Vertailussa oli mukana hakelämmitys- ja maalämpöjärjestelmiä. Hakelämmitysjärjestelmät todettiin tässä kokoluokassa teknisesti liian monimutkaisiksi ja kalliiksi. Maalämpöjärjestelmistä saatiin neljä tarjousta, joista valittiin edullisin sekä teknisesti edistynein ratkaisu.

Lämmitysjärjestelmän käyttöönoton jälkeen järjestelmä on toiminut pääpiirteissään erinomaisen hyvin. Keskimääräinen vuotuinen lämmöntarve on ollut lämpöpumpun oman energiamittarin mukaan noin 14 000–16 000 kWh/a, mikä on vielä vähemmän kuin alkuperäisten mitoitusperusteella oli odotettu. Sähkökustannuksena tämä aiheuttaa vuodessa noin 400–500 euron suuriset lämmityskustannukset, mikä on erittäin kilpailukykyinen lämmityskustannus verrattuna esimerkiksi hakelämmitykseen. Ainoat toistaiseksi kohdatut toimintahäiriöt ovat liittyneet lämmönkeruu- ja lämmönjakopiirien ilmavuotoihin, joista on aiheutunut järjestelmän vikatila. Vikatila on pystytty korjaamaan piirin ilmaamisella.

Työssä saadun kokemuksen perusteella maalämpöpumppujärjestelmää voidaan suositella käytettäväksi saneerauskohteissa rakennuksissa, jossa on valmiina vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä. Tällöin maalämpöjärjestelmä on sekä hankintahinnaltaan, käyttökustannuksiltaan että käyttömukavuudeltaan edullisempi kuin muut lämmitysjärjestelmät. Hake- ja pellettikattilat ovat taloudellisempia puolestaan käyttökohteissa, joissa lämmönkulutus on omakotitalokokoluokkaan verrattuna huomattavasti suurempaa ja joissa kiinteää polttoainetta käyttävän lämpökeskuksen käyttö on rakenteellisesti ja paloturvallisesti helppo järjestää.

LÄHDELUETTELO

de Almeida Anibal T., Ferreira Fernando J. T. E., Both D. (2005) Technical and Economical Considerations in the Application of Variable-Speed Drives With Electric Motor Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol 41, No. 1, January/February 2005

Dincer, Ibrahim; Rosen, Marc (2007) EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development. Elsevier-

Heizomat Gerätebau-Energiesysteme GmbH (2019) HSK-RA type woodchip boiler. Verkkojulkaisu, viitattu 21.2.2019. Saatavilla: https://www.heizomat.de/int/hackschnitzelheizung.php?id=hsk_ra&lang=ENG

Ilmatieteen laitos (2018) Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. Verkkodokumentti, viitattu 10.12.2018. Saatavilla: <https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. (2013) Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas. Ympäristöministeriö, Helsinki.

Motiva (2012) Lämpöä omasta maasta – Maalämpöpumput. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampoa_omasta_maasta_maalampopumput.10752.shtml

Pekkala, R. (2012) Suomela – oman talon käsikirja. Readme.fi Oy, Helsinki.

Reay, D.A, MacMichael, D.B.A (1979) Heat pumps. Design and Applications. Pergamon International Ltd. Oxford.

Sisäasiainministeriö (1979) Suomen rakentamismääräyskokoelma D2. Rakennuksen ilmanvaihto.

Suomen virallinen tilasto (2016a) Asumisen energiankulutus [verkkajulkaisu]. ISSN=2323-3273. 2016. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 25.3.2017].
Saantitapa: http://www.stat.fi/til/asen/2017/asen_2017_2018-11-22_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (2016b) Rakennus- ja asuntotuotanto [verkkajulkaisu]. ISSN=1796-3257. Syyskuu 2016, Maalämmön osuus lämmönlähteenä kasvussa. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 27.3.2017].
Saantitapa: http://www.stat.fi/til/ras/2016/09/ras_2016_09_2016-11-25_kat_001_fi.html

Tilastokeskus (2019) Energian hinnat [verkkajulkaisu]. ISSN=1799-7984. 4. vuosineljännes 2018. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 4.3.2019].
Saantitapa: http://www.stat.fi/til/ehi/2018/04/ehi_2018_04_2019-03-13_tie_001_fi.html

Ympäristöministeriö (2012a) Suomen rakentamismääräyskokoelma D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.

Ympäristöministeriö (2012b) Suomen rakentamismääräyskokoelma D3. Rakennusten energiatehokkuus.

Ympäristöministeriö (2003a) Suomen rakentamismääräyskokoelma C4. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä.

Ympäristöministeriö (2003b) Suomen rakentamismääräyskokoelma D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto.

LIITTEET

Liite 1. Rakennusosien materiaalikoostumus rakennusmuistiinpanojen perusteella.

Ulkoseinän materiaali	paksuus	lämmönjohtavuus	lämmönvastus
Vuorilauta	16 mm	0,12 W/m ² K	0,13 Km ² /W
Ilmarako	50 mm	0,0263 W/m ² K	1,90 Km ² /W
Hirsi	150 mm	0,12 W/m ² K	1,25 Km ² /W
Insuliittilevy	12 mm	0,1 W/m ² K	0,12 Km ² /W
Vuorivilla	50 mm	0,049 W/m ² K	1,02 Km ² /W
Lastulevy	12 mm	0,078 W/m ² K	0,15 Km ² /W
Rtot			4,58 Km ² /W
Tuparakennuksen ulkoseinän U-arvo			0,22
Vuorilauta	16 mm	0,12 W/m ² K	0,13 Km ² /W
Ilmarako	20 mm	0,0263 W/m ² K	0,76 Km ² /W
Tuulensuojalevy	12 mm	0,1 W/m ² K	0,12 Km ² /W
Vuorivilla	100 mm	0,049 W/m ² K	2,04 Km ² /W
Vuorivilla	50 mm	0,049 W/m ² K	1,02 Km ² /W
Lastulevy	12 mm	0,078 W/m ² K	0,15 Km ² /W
Rtot			4,08 Km ² /W
Siipirakennuksen ulkoseinän U-arvo			0,25
Alapohjan materiaali (tupa)			
Betonivalu	100 mm	0,72 W/m ² K	0,14 Km ² /W
Bitumi	3 mm	0,062 W/m ² K	0,05 Km ² /W
Vuorivilla	200 mm	0,049 W/m ² K	4,08 Km ² /W
Lattialaudoitus	28 mm	0,12 W/m ² K	0,23 Km ² /W
Rtot			4,50 Km ² /W
U-arvo			0,22
Alapohjan materiaali (siipi)			
Styrox	100 mm	0,026 W/m ² K	3,85 Km ² /W
Betonivalu	100 mm	0,72 W/m ² K	0,14 Km ² /W
Laatoitus	5 mm	1 W/m ² K	0,01 Km ² /W
Rtot			3,99 Km ² /W
U-arvo			0,25
Yläpohjan materiaali			
Kutterinpuru	100 mm	0,038 W/m ² K	2,63 Km ² /W
Laudoitus	25 mm	0,12 W/m ² K	0,21 Km ² /W
Vuorivilla	250 mm	0,049 W/m ² K	5,10 Km ² /W
Laudoitus	15 mm	0,12 W/m ² K	0,13 Km ² /W
Rtot			8,07 Km ² /W
U-arvo			0,12