

Asuinrakennuksen energiatehokkuuden kehittäminen

Henri Nykänen

Opinnäytetyö
Maaliskuu 2018
Tekniikan ja liikenteen ala
Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Nykänen, Henri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Maaliskuu 2019
	Sivumäärä 70	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Asuinrakennuksen energiatehokkuuden kehittäminen		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Nuutinen Marjukka, Lähdesmäki Pekka		
Toimeksiantaja(t) Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy, jonka asiakkaalla oli tarve saada selvitys lämmitysjärjestelmän muutoksen taloudellisesta kannattavuudesta.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko asuinkerrostalon taloudellisesti kannattavaa irtautua kaukolämmöstä ja siirtyä maalämpö- ja poistoilmalämpöpumppu lämmitysjärjestelmään. Lisäksi arvioitiin, millainen vaikutus lämmitysjärjestelmän muutoksella on kiinteistön hiilidioksidipäästöihin.</p> <p>Opinnäytetyön toteuttamiseksi oli selvitettävä kiinteistön energiakulutuksen nykytila sekä energiankulutuskohteiden osuudet kokonaiskulutuksesta. Kiinteistön energiankulutus-tiedot saatiin asiakkaan energiayhtiön etäluentapalvelusta. Lämmitysjärjestelmä muutoksen taloudellista ja ekologista kannattavuutta arvioitiin vertaamalla lämmitysenergian kustannuksia ja hiilidioksidipäästöjä eri lämmitysjärjestelmien välillä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin kiinteistön lämmitysenergian ja lämmitystehon tarpeelle mitoitettu maalämpöjärjestelmä sekä selvitys lämmitysjärjestelmän muutoksen taloudellisesta kannattavuudesta. Kaukolämmön korvaaminen maa- ja poistoilmalämpöpumppujärjestelmällä ei osoittautunut taloudellisesti kannattavaksi nykyisillä energian hinnoilla, mutta sillä todettiin olevan vähentävä vaikutus kiinteistön lämmityksestä aiheutuviin laskennallisiin hiilidioksidipäästöihin. Lämmitysjärjestelmän mitoituksen luotettavuutta arvioitiin ja tuloksina luotiin ehdotukset mahdollisille jatkoselvityksille.</p> <p>Työn tuloksena saatiin myös useita jatkotoimenpide-ehdotuksia, joita voidaan hyödyntää kiinteistön nykyisen lämmitysjärjestelmän energiatehokkuuden kehittämiseen.</p>		
Avainsanat (asiasanat)		
Poistoilman lämmöntalteenotto, maalämpö, kaukolämpö, energiatehokkuus, STT		
Muut tiedot		

Description

Author(s) Nykänen, Henri	Type of publication Bachelor's thesis	Date March 2018
	Number of pages 70	Language of publication: Finnish
		Permission for web publication: x
Title of publication Improving the energy efficiency of a residential building		
Degree programme Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Nuutinen Marjukka, Lähdesmäki Pekka		
Assigned by Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy		
<p>Abstract</p> <p>The assignor of the bachelor's thesis was Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy which had a customer who wanted to investigate the profitability of investing in changing the heating system.</p> <p>The aim of the thesis was to determine whether it was economically profitable to replace district heat with a ground source heat pump and an exhaust air heat pump. It was also estimated what the effect on carbon dioxide emissions of the building would be.</p> <p>The bachelor's thesis was conducted by determine the current state of the total energy consumption and the share of the different consumption objects in the total energy consumption. Energy consumption data was collected from energy provider's remote reading service. Economical and ecological viability of the changing heating system was estimated by comparing the annual energy cost and the carbon dioxide emissions between different heating systems.</p> <p>As the result of the thesis, a geothermal system was optimized for the total energy consumption and the heating power of the building. In addition, a statement on the viability of the geothermal system was estimated. Replacing the district heat with geothermal and exhaust air heat pumps was not economically profitable but it was estimated that it will reduce calculated carbon emissions if the heating system in the building. The reliability of the optimization of the geothermal system was evaluated and further investigation was introduced in the results.</p> <p>The outcomes of the thesis included several outcome proposals that can be used to improve the energy efficiency of the current heating system in the building.</p>		
Keywords (subjects)		
heat recovery from exhaust ventilation, ground heat, district heat, energy efficiency, STT		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Johdanto.....	7
1.1	Opinnäytetyön lähtökohdat	7
1.2	Toimeksiantaja.....	8
2	Ilmastonmuutoksen hillintä	8
2.1	Suomen päästötavoitteet	9
2.2	Energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt Suomessa	9
2.3	Rakennusten energiankulutus ja energiatehokkuus	10
3	Kaukolämpö.....	11
4	Lämpöpumppu	12
4.1	Lämpöpumpun toimintaperiaate	12
4.2	Lämpöpumpun lämpökerroin ja ympäristövaikutukset	14
4.3	Erilaisia lämpöpumpputekniikoita.....	16
4.3.1	Kaskaditekniikka	16
4.3.2	EVI-tekniikka.....	17
4.3.3	Tulistinlämpöpumput.....	18
4.4	Maalämpö.....	19
4.4.1	Lämmönlähteet	20
4.4.2	Energiakaivojen mitoitus.....	21
4.5	Poistoilman lämmöntalteenotto	23
5	Lämpöpumppujärjestelmän mitoituksessa huomioitavat tekijät.....	24
5.1	Käyttöveden kierron lämpöhäviö	24
5.2	Käyttöveden lämmitys.....	25
5.3	Lämmitysenergian normitus.....	26
5.4	Kiinteistön lämmitystehontarve	27

5.5	Varaajat.....	28
5.6	Lämmönjakolaitteistossa käytettävät lämpötilat.....	28
5.7	Kiinteistön sähkönkulutuksen kasvu	29
6	Opinnäytetyön toteutus.....	29
6.1	Kiinteistön lämmitystekniset laitteet	30
6.2	Kiinteistön lämmitysjärjestelmän tila ennen saneerausta.....	32
6.2.1	Kiinteistön energiankulutus	32
6.2.2	Kiinteistön lämmitystehon tarve.....	36
6.3	Kiinteistön lämmitysjärjestelmätila saneerauksen jälkeen	40
6.3.1	Poistoilmalämpöpumppujen vaikutus kaukolämmön kulutukseen.....	40
6.3.2	Poistoilmalämpöpumppujen vaikutus sähkönkulutukseen	42
6.3.3	Poistoilmalämpöpumppujen vuosihyötysuhde	42
6.3.4	Käyttöveden tuottaminen poistoilmalämpöpumpuilla	43
6.3.5	Poistoilmalämpöpumppujen lämmitysteho.....	44
7	Tulokset	46
7.1	Maalämpöjärjestelmän mitoitus	46
7.1.1	Maalämpöpumppu.....	46
7.1.2	Energiakaivon mitoitus.....	47
7.1.3	Käyttövesivaraajan mitoitus.....	48
7.1.4	Kiinteistön sähkönkulutuksen kasvu	49
7.2	Muut energiatehokkuuden kehittämistoimenpiteet	50
7.2.1	Käyttöveden kiertojohdon lämmityslaitteet	50
7.2.2	Patteriverkoston asetusarvon nostaminen.....	50
7.3	Investointihinta.....	51
7.4	Laskennassa käytetyt energianhinnat	51
7.5	Takaisinmaksuaika	52
7.6	Vaikutukset hiilidioksidipäästöihin	54

8	Yhteenveto	56
8.1	Kannattavuuden arviointi	56
8.2	Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet	57
	Lähteet.....	60
	Liitteet	64
	Liite 1. Vanhan asuintalon lämmönjakokeskuksen mitoitus	64
	Liite 2. Poistoilmalämpöpumppujen lämmityskaaviot.....	66
	Liite 3. Maalämpö- ja poistoilmalämpöpumppujen lämmityskustannukset.	67
	Liite 4. Kaukolämpöjärjestelmän vuotuiset lämmityskustannukset.	68
	Liite 5. Kaukolämpö ja poistoilmalämpöpumppujen lämmityskustannukset.....	69
	Liite 6. Mollier-diagrammi.....	70

Kuviot

	Kuvio 1. Energian kulutus sektoreittain 2016	10
	Kuvio 2. Lämpöpumpun osat ja toimintaperiaate	13
	Kuvio 3. Kylmäaineen kiertoprosessin teoreettinen toiminta Log P,h diagrammissa	14
	Kuvio 4. Kaskaditekniikan periaatekuva	16
	Kuvio 5. EVI-tekniikan periaatekuva	18
	Kuvio 6. Lämpöpumppu, jossa on tulistuksen lauhdutin	19
	Kuvio 7. Energiakaivon rakenne	21
	Kuvio 8. Höytysuhteen vaikutus energiakaivosta otettavaan energiaan.	22
	Kuvio 9. Maalämpökeruupiirin mitoituksessa käytettäviä arvoja	22
	Kuvio 10. 1960-1980-luvun asuinkerrostalon energiatase.	24
	Kuvio 11. Säävyöhykkeet ja mitoituslämpötilat.....	27
	Kuvio 12. Poistoilmalämpöpumput, kopit ja keruuputkisto	31
	Kuvio 13. Kiinteistön kaukolämmön kuukausikulutukset vuosina 2014 - 2017.....	32
	Kuvio 14. Kiinteistön sähkön kuukausikulutukset vuosina 2014 - 2017	33
	Kuvio 15. Kaukolämmön tuntikulutus heinäkuussa 2015 - 2017.....	35

Kuvio 16. Kaukolämmön regressioanalyysi	37
Kuvio 17. Kiinteistön lämmitystehontarve suhteessa ulkolämpötilaan.....	37
Kuvio 18. Poistoilmalämpöpumppujen vaikutus kaukolämmön kulutukseen.....	41
Kuvio 19. Kohteen kuukausittaiset sähkönkulutukset vuosilta 2016 ja 2018.....	42
Kuvio 20. Poistoilmalämpöpumppujen käyttämä sähkö ja tuotettu lämpö	43
Kuvio 21. Lämmityskustannuksien kehitys eri lämmitysjärjestelmillä.....	54
Kuvio 22. Laskennalliset hiilidioksidipäästöt	55

Taulukot

Taulukko 1 Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuudet.	12
Taulukko 2 Kaukolämmön kausihinnoiteltu energianhinta	52
Taulukko 3 Sähkön siirtohinnot	52
Taulukko 4 Lämmitysjärjestelmien energiankulutus sekä ominaispäästökertoimet ..	55

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön lähtökohdat

Opinnäytetyössä tarkasteltiin Suomen Talotekniikka Oy:n saneerauskohteen energiankulutusta. Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko kaukolämmöstä taloudellisesti kannattavaa siirtyä maalämpö- ja poistoilmalämpöpumppujärjestelmään. Lisäksi arvioitiin, millainen vaikutus kiinteistön lämmitysjärjestelmän muuttamisella on hiilidioksidipäästöihin.

Suomessa on paljon opinnäytetyössä tarkasteltavan kohteen kaltaisia asuin-kerrostaloja, joissa voidaan hyödyntää vastaavia lämmitysteknisiä ratkaisuja. Kaukolämpö on ollut suurten kiinteistöjen lämmitysratkaisuna ylivoimainen, sillä kilpailukykyisiä lämmitysratkaisuja on ollut vähän. Nykyisien lämpöpumppujen ja poraustekniikoiden kehittyttyä on lämpöpumppujärjestelmistä muodostunut kilpailukykyinen vaihtoehto kerrostalojen lämmitysratkaisuksi. Lisäksi rakennuksien lämmityksestä aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen osuudella on merkittävä vaikutus Suomen hiilijalanjälkeen. Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen energiatehokkuuden avulla on yksi keskeisiä EU:n ja Suomen tavoitteista ilmastonmuutoksen torjunnassa.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat:

1. Voiko esimerkki kiinteistön lämmityksen hoitaa nykyistä taloudellisemmin maalämpö- ja poistoilmalämmöntalteenotto-järjestelmällä?
2. Mikä on tarvittavan maalämpöpumpun mitoitusteho ja miten paljon energiakaivoja tarvitaan?
3. Millainen vaikutus hankkeella on kiinteistön energiankustannuksiin ja ympäristöpäästöihin?

Opinnäytetyö toteutettiin kehittämistutkimuksena, jossa pyrittiin löytämään taloudellisempi ratkaisu kiinteistön lämmittämiseen. Tutkimuskohteella oli tarkkaan määritetyt tavoitteet, joiden avulla edettiin kohti ongelman ratkaisua. Kvantitatiivisia menetelmiä käytettiin esimerkiksi kulutustietojen ajanjakson valinnassa, jolla pyrittiin

saamaan luotettavampaa tietoa energian kulutuksesta, jonka avulla voitiin määrittää todenmukaiset vaatimukset suunniteltavalle lämmitysjärjestelmälle, sekä arvioida sen soveltuvuutta kohteeseen.

1.2 Toimeksiantaja

Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli Oy on osa Suomen Talotekniikka -konsernia. Suomen Talotekniikka -konserni on talotekniikan uudis- ja korjausrakentamiseen erikoistunut täydenpalvelun asiantuntijayritys. Suomen Talotekniikka työllistää 260 henkilöä Helsingissä, Jyväskylässä, Mäntsälässä, Kuopiossa, Mikkelissä, Tampereella, Pieksämäellä. (Talotekniikan palvelut saman katon alta. n.d.)

Suomen Talotekniikka Energia Mikkeli on rakennuksien energia- ja kylmätekniikkaan erikoistunut yritys, joka tarjoaa energiatehokkuuspalveluita liike-, asuin- ja julkisiin rakennuksiin. Yritys toimii pääsääntöisesti Etelä-Savon alueella, mutta myös ympäröivissä maakunnissa.

2 Ilmastonmuutoksen hillintä

Ilmastonmuutos on maailmanlaajuinen ilmiö, jossa maapallon keskilämpötila nousee ihmisen toiminnasta aiheutuvien kasvihuonekaasujen pitoisuuden kasvusta ilmakehässä. Ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksien kasvu nykyvauhdilla aiheuttaa maapallon keskilämpötilan nousun kahdesta kuuteen asteeseen vuosisadan loppuun mennessä. Keskilämpötilan nousu aiheuttaa eri puolilla maapalloa erilaisia ongelmia, kuten kuivuutta ja tulvia. (Ilmastonmuutos ilmiönä n.d.)

Ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi tarvitaan toimia kansainvälisellä tasolla. Kansainvälistä ilmastopoliittista päätöksentekoa ohjaa YK:n ilmastopöytäkirja ja sitä täydentävä Kiotoon pöytäkirja sekä Pariisin ilmastopöytäkirja. Ilmastopöytäkirjojen tavoitteena on velvoittaa sopimuksiin sitoutuneet maat vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. (Ilmastonmuutoksen hillitseminen. 2018.)

2.1 Suomen päästötavoitteet

Euroopan Unionissa sovitut ilmastopoliittiset tavoitteet ohjaavat Suomen kansallista ilmasto- ja energiapoliittista päätöksentekoa. EU:n keskeisenä tavoitteena on 20-20-20-tavoite, jolla tarkoitetaan 20 prosentin vähennystä hiilidioksidipäästöihin, 20 prosentin uusiutuvan energian käyttöä sekä 20 prosentin energiatehokkuuden parantamista vuoteen 2020 mennessä. EU:n komissio asettaa jäsenvaltiokohtaiset tavoitteet. (Valtioneuvoston selonteko kansallisesta... 2017., 20-21.)

EU- komissio asetti Suomelle valtiokohtaiseksi päästövelvoitteeksi vuoteen 2020 mennessä päästökaupan ulkopuolisten kasvihuonepäästöjen vähentämisen 16 %:lla vuoden 2005 tasoon nähden ja uusiutuvan energian osuuden nostamisen 38 %:iin. Suomen päästötavoite vuodelle 2030 on päästökaupan ulkopuolisten päästöjen vähentäminen 39 %:iin vuoteen 2005 verrattuna. (Valtioneuvoston selonteko kansallisesta... 2017., 20-23.)

Suomen kansalliseksi ilmastotavoitteeksi on asetettu pitkän aikavälin tavoite, jossa Suomesta tulisi hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteen onnistumisen tueksi on säädetty ilmastolaki (609/2015), joka ohjaa kansallista poliittista päätöksen tekoa. Ilmastolaissa on asetettu päästövähennystavoitteeksi vähintään 80 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2005 päästöihin. (Valtioneuvoston selonteko kansallisesta... 2017., 15-16.)

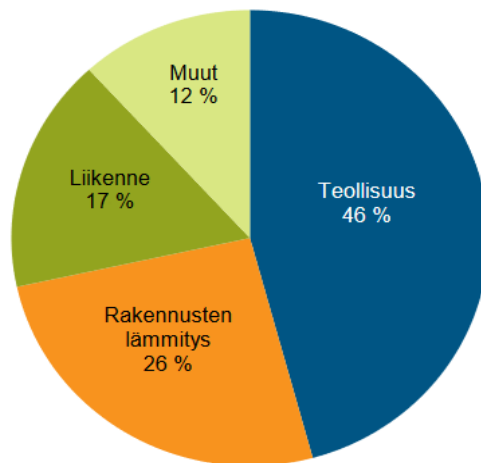
2.2 Energiankulutus ja kasvihuonekaasupäästöt Suomessa

Vuonna 2016 Suomen kokonaisenergiankulutus oli 375 terawattituntia (TWh), josta sähkön osuus oli 85,2 TWh. Uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta oli 34%. Suomen tavoitteena uusiutuvan energian osuudelle on 38% energianloppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Tämä osuus saavutettiin ensimmäisen kerran vuonna 2014. Vuonna 2016 uusiutuvan energian osuus kokonaisloppukulutuksesta oli 39 %.(Uusiutuvan energian käyttö ennätystasolla vuonna 2016. 2017.)

Kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt olivat 58,8 miljoonaa hiilidioksidiekvivalenttitonnia (t CO₂-ekv). Hiilidioksidiekvivalenttonni on yksikkö, jolla kuvataan eri kasvihuonekaasujen vaikutusta ilmastoon. Kasvihuonekaasujen osuudet kokonaispäästöistä olivat seuraavat: 81 prosenttia hiilidioksidia, 8 prosenttia metaania, 8 prosenttia dityppioksidia ja 3 prosenttia F-kaasuja. (Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2016. 2017.)

2.3 Rakennusten energiankulutus ja energiatehokkuus

Rakennuksien lämmittämiseen käytetään noin neljäsosa kaikesta Suomessa käytettävästä energiasta. Rakennuksien lämmittämiseen käytettävän energian osuus on merkittävä, joten rakennuksien energiatehokkuutta parantamalla saadaan vähennettyä merkittävästi Suomen kokonaisenergiankulutusta ja kasvihuonepäästöjä. Kuvio 1 nähdään, kuinka energian käyttö jakautuu Suomessa eri sektoreille.



Kuvio 1. Energian kulutus sektoreittain 2016 (Energiatilasto 2017, 5)

Rakennusten energiatehokkuuden kehittämiseksi EU on laatinut rakennusten energiatehokkuutta käsitteleviä direktiivejä, joilla ohjataan jäsenvaltiot laatimaan kansallisia ohjeita rakennusten energiatehokkuuden kehittämiseen. Direktiiveissä ohjeistetaan jäsenvaltioita tiukentamaan energiatehokkuutta koskevia vähimmäis-

vaatimuksia uusille ja korjattaville rakennuksille. (Valtioneuvoston selonteko keskipitkän... 2017., 34.)

3 Kaukolämpö

Kaukolämpö on yleisin Suomessa käytetty lämmitysmuoto. Kaukolämpöä tuotetaan pääasiassa polttolaitoksissa, joissa lämpöä voidaan tuottaa erikseen tai yhteistuotannossa sähkön kanssa. Kaukolämpöä tuotetaan polttolaitosten ohella myös lämpöpumpuilla hyödyntämällä jätevesien ja teollisuuden hukkalämpöä.

(Kaukolämpöä tuotetaan lähellä asiakasta. n.d.)

Tuotantolaitoksessa tuotettu lämpö toimitetaan asiakkaalle kaukolämpöverkostossa kiertävän veden avulla. Verkoston vedestä lämpö siirretään lämmönvaihtimen avulla rakennuksen lämpöverkostoon tai käyttöveden lämmitykseen. Asiakkaalle tulevan veden lämpötila vaihtelee ulkolämpötilan mukaan välillä 65 °C- 115 °C. (Lämpöä kotiin keskitetysti. 2012.)

Kaukolämpölaitteiden mitoituksessa, huollossa, käytössä noudatetaan määräyksiä ja ohjeistuksia. Kaukolämpölaitteiden määräyksien ja ohjeiden tavoitteena on luoda tehokas toiminta lämmönmyyjän ja asiakkaan välillä. Energiateollisuuden K1-julkaisussa on esitetty perusvaatimukset kaukolämpöjärjestelmän suunnittelulle, asennukselle ja laitteille. (Julkaisu K1/2013, 1.)

Kaukolämmön ympäristövaikutukset ovat riippuvaisia tuotantolaitoksessa käytettävästä tekniikasta sekä käytettävistä polttoaineista. Yhteistuotantolaitoksissa voidaan tuottaa sähköä ja lämpöä samanaikaisesti, jolloin tuotantolaitoksen hyötysuhde on parempi, jolloin polttoaine käytetään tehokkaammin. Suomessa polttolaitoksien savukaasut puhdistetaan tehokkaasti. (Lämpöä kotiin keskitetysti. 2012.)

Taulukosta 1 voidaan havaita, että polttolaitoksissa tuotetun kaukolämmön polttoaineista valtaosa on fossiilisia polttoaineita. Merkittävimpiä käytettäviä fossiilisia polttoaineita ovat kivihiili, maakaasu ja turve.

Taulukko 1 Kaukolämmön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden osuudet
(Kaukolämpötilasto 2017, 2018, 3)

Polttoaine	2017
Maakaasu ja LNG	12,8 %
Kivihiili	27,8 %
Turve	15,5 %
Metsäpolttoaine	18,4 %
Teollisuuden puutähte	11,1 %
Muut biopolttoaineet	3,6 %
Yhdyskuntajäte/sekajäte *	6,0 %
Sekapolttoaineet	2,0 %
Raskas polttoöljy	0,9 %
Kevyt polttoöljy	0,9 %
Muut	1,0 %

* = sisältää myös biohajoavan osan

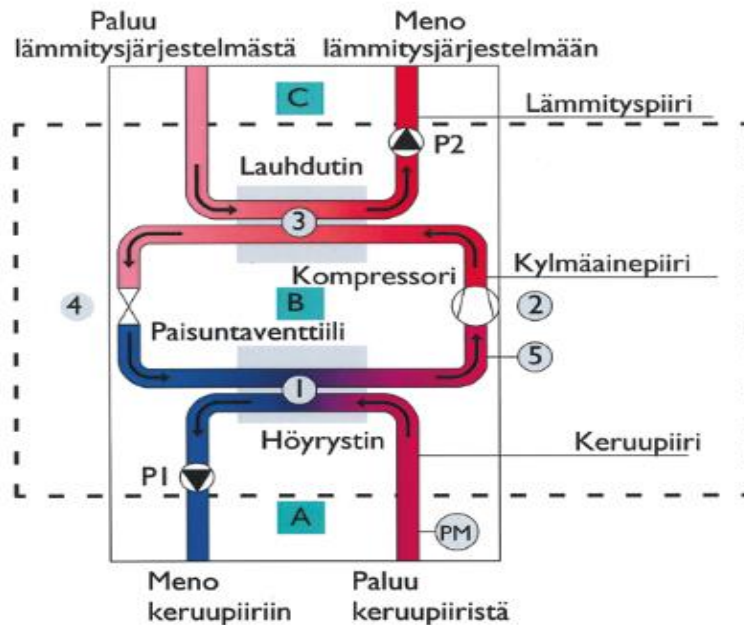
4 Lämpöpumppu

4.1 Lämpöpumpun toimintaperiaate

Lämpöpumppu on laite, joka mahdollistaa lämpöenergian siirtämisen matalammasta lämpötilatasosta korkeampaan lämpötilatasoon. Energian siirtyminen tällä tavoin edellyttää ulkopuolisen energian tuomista prosessiin. Lämpöpumpun toiminta perustuu neljään fysikaaliseen luonnonilmiöön:

1. Lämpöenergian siirtyminen korkeammasta lämpötilasta matalampaan.
2. Nesteen höyrystyminen kaasuksi.
3. Höyryn lauhtuminen nesteeksi.
4. Aineen olomuodon muutoksessa joko vapautuu tai sitoutuu energiaa,
(Lämpöpumput. 2012, 1)

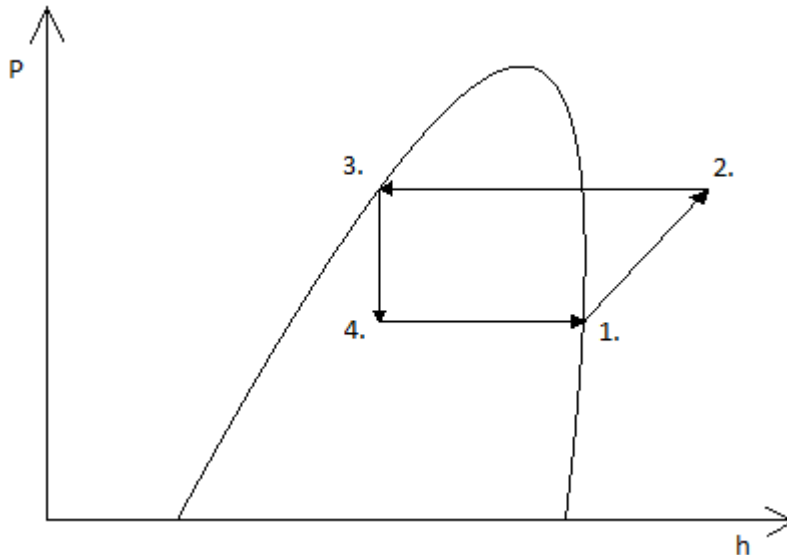
Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, lauhdutin, kompressor ja paisuntaventtiili. Kuviossa 2 on esitetty lämpöpumpun periaatekuva. Kuviossa 3 on esitetty lämpöpumpun kylmäaineen teoreettinen toiminta Log P,h diagrammissa.



Kuvio 2. Lämpöpumpun osat ja toimintaperiaate (Juvonen & Lapinlampi. 2013, 12)

Lämpöpumpun toimintaperiaate on seuraava:

1. Höyrystimessä keruepiirin (A) lämpöenergia siirtyy lämpöpumpun kylmäainepiiriin (B), jolloin kylmäaine höyrystyy nesteestä kaasuksi.
2. Lämpöpumpun kompressor nostaa kylmäainehöyryn painetta, jolloin lämpötila kohoaa. Kompressor käyttää käyttövoimanaan sähköä, joka siirtyy kylmäaineen lämpöenergiaksi ja nostaa myös kylmäaineen lämpötilaa.
3. Lämpöpumpun lauhduttimessa kylmäaine lauhtuu höyrystä nesteeksi, jolloin lämpöenergia siirtyy lämmitysjärjestelmään (C).
4. Lämpöpumpun paisuntaventtiilillä lasketaan kylmäainepiirissä virtaavan kylmäaineen painetta. Paisuntaventtiilin jälkeen kylmäaine palaa höyrystimelle ja prosessin kierto alkaa alusta. (Juvonen & Lapinlampi. 2013., 12)



Kuvio 3. Kylmäaineen kiertoprosessin teoreettinen toiminta Log P,h diagrammissa (Boles & Cengel. 2015, 611, muokattu)

Kuviossa 3 pystyakselilla on paine (P) ja vaaka-akselilla entalpia (h). Kuviossa on neljä eri pistettä, 1, 2, 3 ja 4. Pisteen 1 ja 2 välillä kylmäaineen paine ja entalpia kasvaa. Tämä johtuu kompressorin tekemästä työstä. Pisteen 2 ja 3 välillä kylmäaineen entalpia pienenee, mikä johtuu kylmäaineen lauhtumisesta höyrystä nesteeksi lämpöpumpun lauhduttimessa. Pisteen 3 ja 4 välillä kylmäaineen paine laskee, mikä johtuu paineen alenemisesta paisuntaventtiilissä. Pisteen 4 ja 1 välillä kylmäaineen entalpia kasvaa, mikä johtuu kylmäaineen höyrystymisestä lämpöpumpun höyrystimestä.

4.2 Lämpöpumpun lämpökerroin ja ympäristövaikutukset

Lämpöpumpun tehokkuuden kuvaamisen käytetään lämpökerrointa. Lämpökerroin kertoo, kuinka moninkertaisen määrän lämpöä lämpöpumppu tuottaa kulutettuun energiamääräänsä verrattuna. Esimerkiksi lämpöpumpun lämpökertoimen arvolla 3 lämpöpumppu tuottaa yhdellä kilowattitunnilla yhteensä kolme kilowattituntia lämpöä. Lämpökertoimesta käytetään lyhennettä COP (Capacity Of Performance). (Perälä & Perälä. 2013, 30.)

Lämpöpumpun teoreettinen hyötysuhde voidaan laskea kaavalla 1.

$$COP_{MAX} = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (1)$$

Jossa	COP_{max}	Teoreettinen lämpöpumpun hyötysuhde
	T_L	Lämmön keruulämpötila, °C
	T_H	Lämmön luovutuslämpötila, °C

Kaavalla 1 laskettuna saadaan teoreettisia hyötysuhteita. Lämpöpumppujen todelliset hyötysuhteet ovat matalampia, sillä todellisuudessa lämpöpumppu ei toimi ideaalisesti. Lämpöpumpun hyötysuhteen voidaan kuitenkin todeta olevan riippuvainen lämmönkeruulämpötilasta sekä lämmönluovutuslämpötilasta. (Boles & Cengel. 2015, 615.)

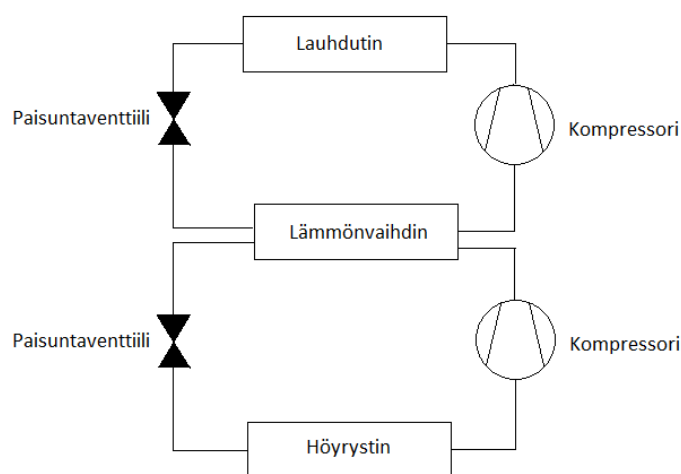
Lämpöpumpun lämpökertoimeen vaikuttaa kylmäaineen höyrystymislämpötila ja lauhtumislämpötila. Lauhtumislämpötilan laskeminen yhdellä asteella tai höyrystymislämpötilan nostaminen yhdellä celsiusasteella nostaa lämpöpumpun hyötysuhdetta kahdesta neljään prosenttia. (Boles & Cengel. 2015, 610.)

Lämpöpumpun käytön aikaiset ympäristövaikutukset koostuvat lämpöpumpun käyttämästä sähköstä ja lämpöpumpuissa käytettävistä kylmäaineista. Käytetyn sähkön ympäristövaikutukseen vaikuttaa se, miten sähkö on tuotettu. Kylmäaineilla on käytettävästä aineesta riippuen erilaisia ympäristöön vaikuttavia ominaisuuksia. Lämpöpumpuissa käytettävät kylmäaineet ovat kasviuonekaasuja. Jokaiselle kylmäaineelle on määritetty GWP-arvo, joka kuvaa eri kasviuonekaasujen ilmastoalämmittävää vaikutusta suhteessa. Kylmäainetta voi päästä ilmakehään lämpöpumpun käytöstä poiston tai vikaantumisen yhteydessä. (Lämpöä omasta maasta. 2012.)

4.3 Erilaisia lämpöpumpputekniikoita

4.3.1 Kaskaditekniikka

Kaskaditekniikka on lämpöpumppu sovellus, jossa on käytössä kaksi kylmäainepiiriä. Kylmäainepiireissä käytetään eri kylmäaineita. Toisessa kylmäainepiirissä käytetään matalalle lämpötilalle tarkoitettua kylmäainetta ja toisessa korkealle lämpötilalle sopivaa kylmäainetta. Kylmäainepiirit on kytketty toisiinsa lämmönvaihtimen avulla. (ks. kuvio 4).



Kuvio 4. Kaskaditekniikan periaatekuva (Domestic High Temperature Heat Pumps. 2016., 22, muokattu)

Kylmäainepiirien välillä lämpöenergia, siirtyy kun ensimmäisessä piirissä käytettävä kylmäaine höyrystää toisessa kylmäainepiirissä käytettävän kylmäaineen kylmäainepiirien välissä olevassa lämmönvaihtimessa.

Kaskadilämpöpumpuissa ensimmäisessä kylmäainepiirissä on käytössä yleensä matalan lämpötilan alueelle tarkoitettu kylmäaine, joka höyrystyy matalissa lämpötiloissa, joka mahdollistaa lämmönkeruun alhaisista lämpötilatasoista.

Toisessa kylmäainepiirissä on käytössä korkeammalle lämpötilalle tarkoitettu kylmäaine. Korkeammalle lämpötilalle tarkoitettu kylmäaine mahdollistaa lämpöpumpun lauhduttimelle korkeamman lauhtumislämpötilan.

Kaskaditekniikka ansiosta lämpöpumpulla voidaan tuottaa korkeita lämpötiloja hyvällä hyötysuhteella. Osa kaskaditekniikkaa hyödyntävistä lämpöpumpuista voi käyttää tilanteen mukaan joko molempia tai vain toista kylmäainepiiriä optimaalisen hyötysuhteen varmistamiseksi. (Domestic High Temperature Heat Pumps. 2016, 21.)

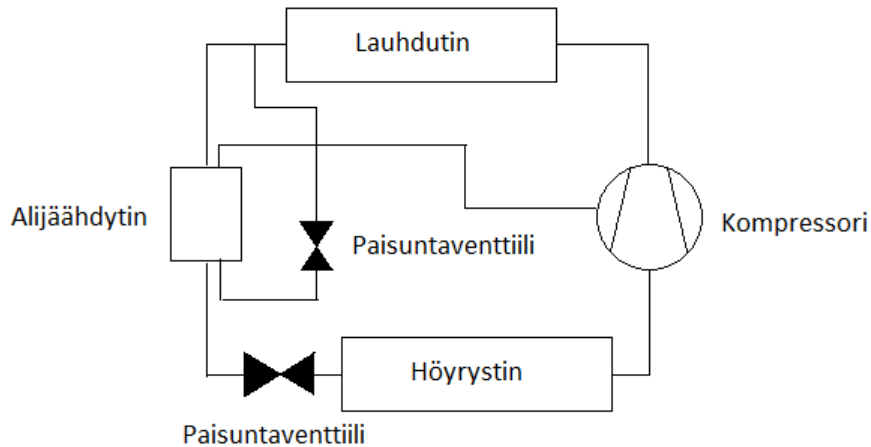
4.3.2 EVI-tekniikka

EVI-tekniikka on lämpöpumppu sovellus, jossa perinteiseen lämpöpumppuun on lisätty ylimääräinen silmukka, alijäähdytin ja paisuntaventtiili (ks. kuvio 5).

Ylimääräisen silmukan ansiosta osa pääkylmäaine virrasta voidaan hyödyntää päävirtauksen kylmäaineen alijäähdyttämiseen. Päävirtauksen alijäähdyttäminen mahdollistaa alhaisemman lämpötilatason lämpöpumpun höyrystimelle.

Kylmäaineen alijäähdytys toteutetaan alijäähdytys lämmönvaihtimessa. Alijäähdytys lämmönvaihtimessa kylmäaineen päävirtaus ja ylimääräisessä silmukassa kiertävä kylmäaine kulkevat toisiinsa nähden vastavirtaan. Ylimääräisessä silmukassa kylmäaineen paine on laskettu paisuntaventtiilillä sille tasolle, että kylmäaine höyrystyy alijäähdytys vaihtimessa, jolloin päävirtauksen kylmäaineen lämpötila laskee. Alijäähdytys vaihtimessa höyrystynyt kylmäaine ruiskutetaan kompressorin.

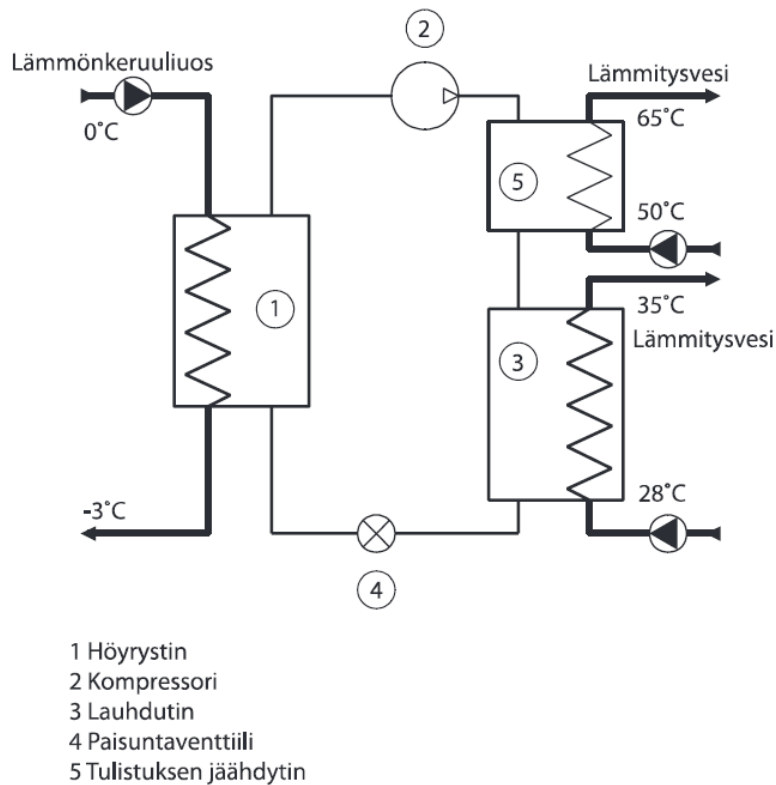
EVI-tekniikan ansiosta lämpöpumpun lauhduttimelle saadaan suurempi massavirta, verrattuna perinteiseen lämpöpumpputekniikkaan, jos molemmissa lämpöpumpuissa olisi käytössä saman tehoinen kompressorin. EVI-tekniikkaa käytetään kuitenkin siitä syystä, että siinä käytettävä kylmäaineen ruiskutus kompressorille mahdollistaa suuremman kompressorin käytön verrattuna perinteiseen lämpöpumppu tekniikkaan. Tästä johtuen lämpöpumpulla voidaan tuottaa korkeampia lämpötilatasoja alhaisissa höyrystymislämpötiloissa. (Domestic High Temperature Heat Pumps. 2016, 22.)



Kuvio 5. EVI-tekniikan periaatekuva (Domestic High Temperature Heat Pumps. 2016, 23, muokattu)

4.3.3 Tulistinlämpöpumput

Tulistinlämpöpumpuissa on ylimääräinen lämmönvaihdin, jonka avulla voidaan hyödyntää kylmäaineen korkealämpötilaa (70 - 110 °C) heti kompressorin jälkeen (ks. kuvio 6). Tulistuksen lämmönvaihdin on mitoitettu korkeille lämpötiloille ja pienille virtaamille. Tulistuksen lämmönvaihtimen jälkeen kylmäaine johdetaan varsinaiseen lauhduttimeen, jossa kylmäaine lauhtuu nesteeksi ja luovuttaa lämpönsä matalampaan lämpötilatasoon. Tulistus lämmönvaihtimen avulla voidaan tuottaa lämmintä käyttövettä nostamatta varsinaista lauhtumislämpötilaa, jolloin lämpöpumpun hyötysuhde pysyy hyvänä. (Perälä & Perälä. 2013., 69). Tulistus vaihtimella hyödynnettävä lämmitysteho on enintään 10 - 30 % kompressorin lämmitystehosta (Maalämpöpumput. Pientalot. 2018., 3).



Kuvio 6. Lämpöpumppu, jossa on tulistuksen lauhdutin (Maalämpöpumput. Pientalot. 2018, 3)

4.4 Maalämpö

Maalämmöllä tarkoitetaan lämpöenergiaa, joka on varastoitunut maa- ja kallioperään sekä vesistöihin. Maaperän pintaosiin ja vesistöön varastoitunut lämpöenergia on peräisin suurimmaksi osin peräisin auringosta. Maanpinnan pintaosien lämpötila on Suomessa keskimäärin noin kaksi astetta ilman keskilämpötilaa suurempi. (Juvonen & Lapinlampi. 2013, 7.)

Syvällä kallioperässä lämpöenergia on peräisin maan ytimessä tapahtuvasta radioaktiivisesta hajoamisesta. Kallioperän lämpötila vakioituu Suomessa noin viiteen asteeseen viidentoista metrin syvyydessä. Kallioperän lämpötila nousee keskimäärin puolesta yhteen asteeseen jokaista sataa metriä kohden. Kallioperän lämmönjohtavuus vaihtelee paikallisen kallioperän ominaisuuksien mukaan. Lämmönjohtavuuteen vaikuttavat ominaisuudet ovat pohjavedenliikkeet, kallioperän koostumus ja rikkonaisuus sekä kivilaji. (Mts. 7.)

4.4.1 Lämmönlähteet

Maaperä

Maaperän pintaosiin varastoituneen energiaa voidaan hyödyntää maalämpöpumpun lämmönlähteenä, jos tontti on riittävän suuri. Maaperän pintaosiin asennettavat putket asennetaan vaakatasoon. Maaperän lämmönjohtavuus ja kosteuspitoisuus ovat tärkeimmät keruuputkiston mitoitukseen vaikuttavat tekijät. Suurin osa Suomen maalajeista soveltuu maalämmön keruujärjestelmälle. Kuiva maaperä kuten soraharju ei sovellu vaakatasoon asennettavalle keruujärjestelmälle.

(Maalämpöpumput. Pientalot. 2018., 7)

Vesistö

Vesistöön asennettavalle keruujärjestelmälle sopii lämmönlähteeksi lammet, järvet ja merenrannat. Vesistön syvyyden tulee olla vähintään 2 metriä, jotta keruuputkiston jäätymisriski on mahdollisimman pieni. Keruuputkisto tulee ankkuroida ja merkitä selkeästi. Vesistöön asennettu keruujärjestelmä tarvitsee aina vesialueen omistajan luvan sekä toimenpideluvan. (Maalämpöpumput. Pientalot. 2018., 7)

Energiakaivo

Energiakaivo on porakaivo, johon on laskettu lämpöpumpun keruuputkisto. Keruuputkistossa kiertävän lämmönkeruunesteen avulla energiakaivosta voidaan siirtää kallioon ja pohjaveteen varastoitunut energia siirtää rakennuksen lämmittämiseen. (Maalämpöpumput. Pientalot. 2018., 7)

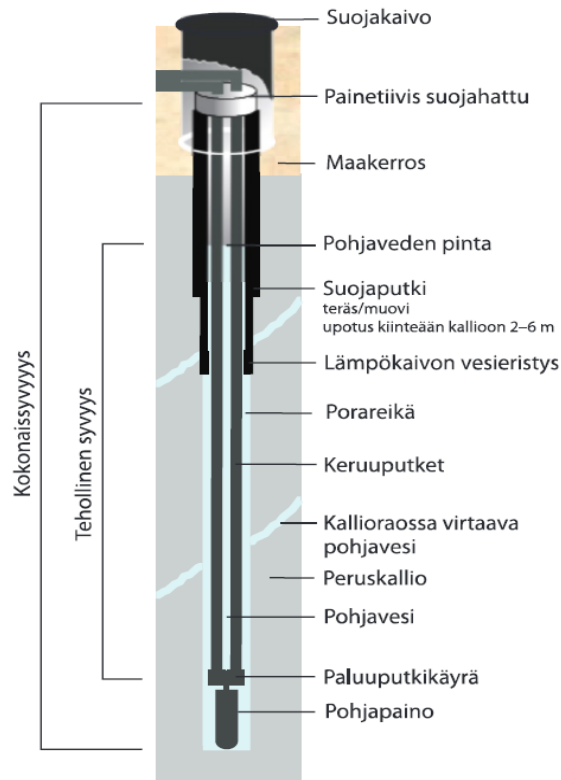
Energiakaivon porareikien syvyys ja lukumäärä on riippuvainen rakennuksen energiantarpeesta. Suomessa porattujen energiakaivojen porareikien halkaisijat vaihtelevat 105 - 165 millimetrin välillä ja syvyys 120 - 300 metrin välillä.

Energiakaivot porataan yleensä suoraan alaspäin, mutta niitä voidaan porata myös vinoon. Vinoon poraamiseen syynä on yleensä se, että ahtaalle paikalle tehdään useita energia-kaivoja. (Juvonen & Lapinlampi. 2013., 33-34)

Energiakaivossa keruuputkisto upotetaan energiakaivoon. Energiakaivoon asennettavan keruuputkiston päähän laitetaan pohjapaino, koska keruuputki ja

putkessa oleva keruuneste ovat vettä kevyempiä. Pohjapainon ansiosta keruuputkisto saadaan upotettua kaivoon. (Juvonen & Lapinlampi. 2013.,33)

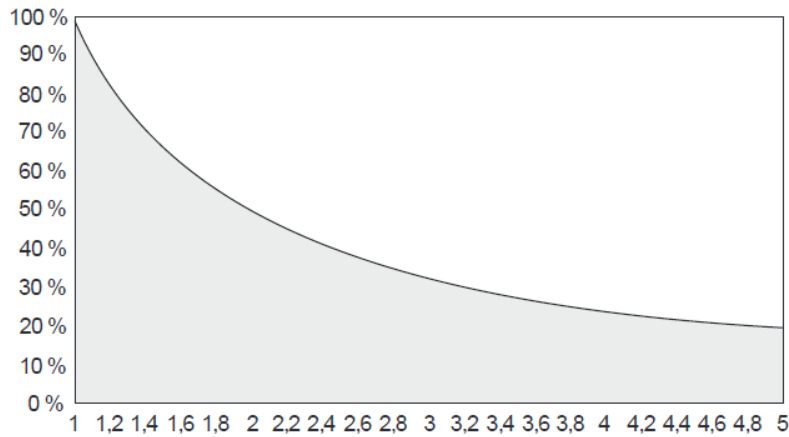
Energiakaivon tehollisella syvyydellä tarkoitetaan sitä osaa keruuputkistosta, joka peittyy kaivon vedellä. Energiakaivon tehollista syvyyttä sekä muita komponentteja on esitetty kuviossa 7.



Kuvio 7. Energiakaivon rakenne (Juvonen & Lapinlampi. 2013, 35)

4.4.2 Energiakaivojen mitoitus

Energiakaivojen mitoituksen perustana on kiinteistön lämmitysenergian ja asennettavan lämpöpumpputjärjestelmän koko sekä lämpöpumpun hyötysuhde. Näiden tietojen avulla voidaan arvioida energiakaivosta otettavan vuotuisen energiantarve sekä energiakaivosta otettava suurin hetkellinen tehontarve. (Maalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. 2018., 5) Hyötysuhteen vaikutusta energiakaivosta otettavaan lämmitysenergiaan on havainnollistettu kuviossa 8.

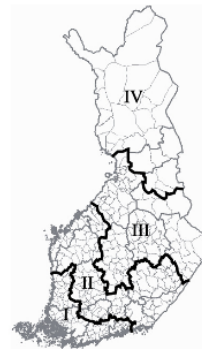


Kuvio 8. Höytysuhteen vaikutus energiakaivosta otettavaan energiaan.

(Maalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. 2018, 6)

Kuviossa 8 on pystyakselilla lämpöpumpun käyttämän sähkön osuus ja vaaka-akselilla lämpöpumpun hyötysuhde. Kuvioista voidaan havaita, että lämpöpumpun hyötysuhteen kasvaessa energiakaivosta otettavan energian osuus kasvaa ja kulutetun sähkön osuus pienenee. Tästä johtuen suuremmalla hyötysuhteella toimiva lämpöpumpppujärjestelmä tarvitsee enemmän lämpökaivoja toimiakseen kuin heikommalla hyötysuhteella toimiva maalämpöjärjestelmä.

	I alue	II alue	III alue	IV alue
Keskilämpötila, °C	+5 (5,4)	+4 (4,7)	+2 (3,3)	0 (-0,3)
sulkeissa D5 2012 tiedot				
Mitoitettava ulkolämpötila, °C	-26	-29	-32	-38
Lämpökaivo				
kWh/m	150	140	130	120
W/m	42 - 43	38 - 41	34 - 38	30 - 35
Liuksen keskilämpötila, °C	-2,5...+1	-2,5...+1	-2,5...+1	-2,5...+1
Pintamaa				
kWh/m	60	50	45	35
W/m	12 - 15	11 - 14	10 - 13	10 - 12
Liuksen keskilämpötila, °C	-2,5...+1	-2,5...+1	-2,5...+1	-2,5...+1
Vesistö				
kWh/m	90	80	70	50
W/m	20	20 - 25	15 - 20	15 - 20
Liuksen keskilämpötila, °C	+1...+2	+1...+2	+1...+2	+1...+2



Kuvio 9. Maalämpökeruupiirin mitoituksessa käytettäviä arvoja (Maalämpöpumppu opas. n.d., 20, muokattu)

Energiakaivojen mitoituksessa voidaan käyttää apuna taulukko arvoja (ks. kuvio 9). Energiakaivojen mitoituksessa taulukkoarvot soveltuvat paremmin yhden tai kahden kaivon mitoitukseen, koska suurempien kiinteistöjen lämmöntarve edellyttää useammasta kaivosta koostuvaa lämpökaivokenttää. Suurissa useasta lämpökaivosta koostuvasta energiakentässä liian lähellä toisiaan olevat kaivot jäädyttävät toisiaan. Tästä johtuen suurtenkaivokenttien mitoitus tulisi tehdä perustuen mallinnus ja termisenvastetestin perusteella. (Kerrostalojen maalämpöjärjestelmiin tehokkuutta kaivokentän suunnittelulla. n.d.)

Termisestä vastetestistä käytetään usein nimitystä TRT-mittaus. Terminen vastetesti suoritetaan testiä varten poratussa testaus kaivossa. Testauskaivon avulla voidaan määrittää paikallisen kallioperän keskimääräinen lämpötila sekä kallion lämmönjohtokyky. Energiakentän optimaalisen mitoituksen onnistumiseksi kannattaa suorittaa TRT-mittaus. Mittaus tulosten perusteella mitoitetulla energiakentällä voidaan välttyä yli- ja alimitoituksilta. (TRT-mittaus. n.d.)

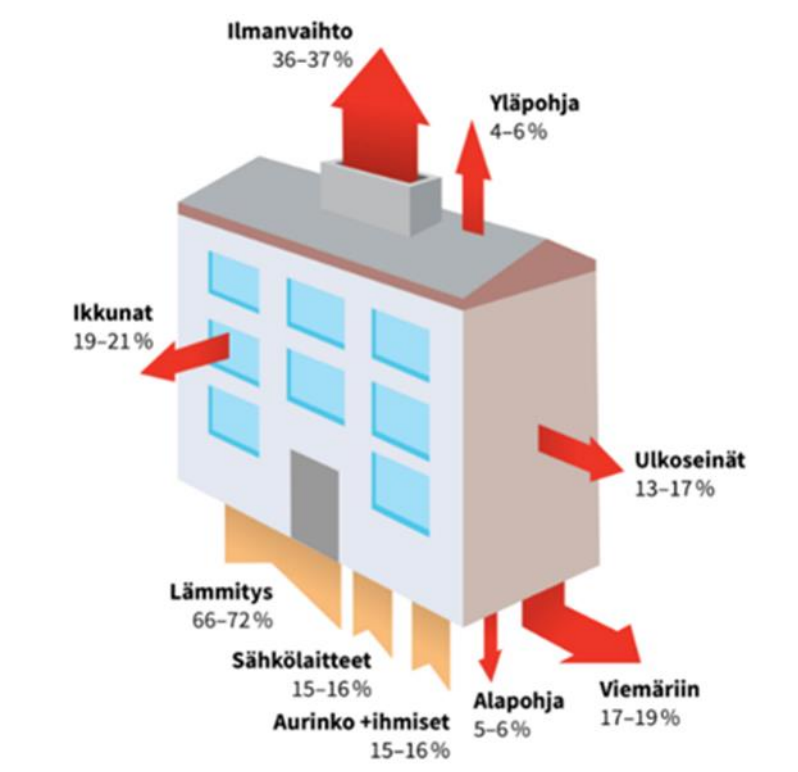
Energiakaivon alimitoitus johtaa siihen, että keruupiiristä palaavan nesteen lämpötila laskee. Keruupiirin lämpötila tason laskiessa lämpöpumpun hyötysuhde heikkenee. Pahasti alimitoitettu energiakaivo voi jäättyä, jolloin on vaarana, että keruuputkisto tai jopa itse kaivo vaurioituu. (Juvonen & Lapinlampi. 2013., 45)

4.5 Poistoilman lämmöntalteenotto

Ilman poistoilman lämmöntalteenottoa menetetään asuinkerrostalo kohteessa vuositasolla 36-46 % kaikesta lämmityksen käytettävästä energiasta. Poistoilman hyödyntäminen lämpöpumppujen lämmönlähteenä on tehokas tapa parantaa rakennuksen energiatehokkuutta ja vähentää osto energian tarvetta. (Rantala. 2014, 68.)

Poistoilmasta on saatavilla vuodenajasta ja ulkolämpötilasta riippumatta lämpöä vakioteholla, koska lämmönlähteenä on talon noin 21-asteinen sisäilma. Poistoilmasta ei voida kuitenkaan voida tuottaa kaikkea talon tarvitsemaa

lämmitysenergiaa. Lämmitystarpeen ollessa kylminä ajankohtina suurempi täytyy loppuosa tuottaa, jolloin muulla lämmönlähteellä. (Rantala. 2014, 53.)



Kuvio 10. 1960-1980-luvun asuinkerrostalon energiatase. (Virta & Pylsy. 2013, 19)

Kuviosta 10 voidaan havaita, että suurin yksittäinen lämpöhäviöiden aiheuttaja tämän ikäisissä asuinkerrostaloissa on ilmanvaihto. Ilmanvaihdon suuri lämpöhäviö johtuu pääosin 1960-luvulla yleistyneestä koneellisesta poistoilmanvaihdosta. Koneellisessa poistoilmanvaihtojärjestelmässä poistoilman lämpöenergiaa puhalletaan hyödyntämättömänä harakoille.

5 Lämpöpumpujärjestelmän mitoituksessa huomioitavat tekijät

5.1 Käyttöveden kierron lämpöhäviö

Asuinrakennuksissa lämpimän käyttöveden kiertoputkiston lämpöhäviö on merkittävä yksittäinen energiankulutustekijä. Lämpimän käyttöveden kierron hukkalämpö aiheuttaa lämmityskauden ulkopuolella turhaa lämpökuormaa

sisätiloihin. (Lylykangas ym. 2015., 119). Lämpimän käyttöveden kierto aiheuttaa lähes tasaisen lämpökuorman kiinteistöön, koska lämpimän käyttöveden kierto on jatkuvasti käytössä.

Lämpimän käyttöveden kierto on pakollinen osassa asuinrakennuksissa, koska Ympäristöministeriön vesi ja viemärlaitteiden asetuksessa 1047/2017 on määrätty lämminvesilaitteiden vähimmäislämpötilaksi + 55 °C ja lämpimän veden saatavuuden varmistamisen vesikalusteesta 20 sekunnin kuluessa. (A 1047/2017, 5 §.).

5.2 Käyttöveden lämmitys

Käyttöveden lämmittämiseen käytettävä energia voidaan arvioida laskennallisesti keskimääräisen kokonaisveden kulutuksen perusteella. Kerrostalo asukkaan keskimääräinen kokonaisveden kulutus on 155 litraa vuorokaudessa asukasta kohden, josta noin 40% on lämmintä käyttövettä. (Vedenkulutus taloyhtiössä. 2018).

Käyttöveden lämmittämiseen tarvittava voidaan laskea kaavalla 2. (Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. 2019)

$$Q_{kv} = (\rho * c_p * V_{lv} * (t_2 - t_1))/3600 \quad (2)$$

missä Q_{kv} käyttöveden lämmittämiseen tarvittava energia, kWh

ρ Veden tiheys, kg/m³

c_p veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kgK

V_{lv} lämpimän käyttöveden määrä, m³

t_2 lämmitetyn veden lämpötila, °C

t_1 kylmän veden lämpötila, °C

3600 kerroin, jolla tehdään yksikkö muunnos kJ -> kWh

5.3 Lämmitysenergian normitus

Lämmitysenergiankulutus normitetaan, jotta rakennuksen vuotuiset ja kuukausittaiset energiankulutustiedot ovat vertailukelpoisia. Kulutuksen normitus tehdään lämmitystarvelukujen avulla. Lämmitystarvelukujen toiminta perustuu rakennuksen lämmittämisen verrannollisuuteen sisä- ja ulkolämpötilan välillä. Käyttöveden lämmittämiseen käytettävä lämmitysenergian osuus ei ole riippuvainen ulkolämpötilasta, joten se vähennetään normeerattavasta lämmitysenergiasta.

Lämmitysenergiankulutuksen normitus tehdään kaavalla 3.

$$Q_{norm} = \frac{S_N}{S_{tot}} * (Q_{kok} - Q_{lv}) + Q_{lv} \quad (3)$$

missä Q_{norm} Rakennuksen normitettu lämmitysenergiankulutus

Q_{kok} Rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarve

Q_{lv} Käyttöveden lämmittämisen käytetty energia

S_N Normaalivuoden tai -kuukauden (1981-2010) lämmitystarveluku

S_{tot} Toteutunut lämmitystarveluku

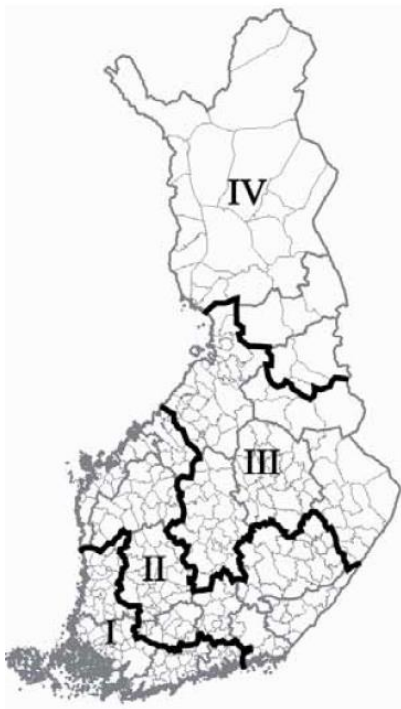
Lämmitystarveluku lasketaan laskemalla yhteen kuukauden päivittäisten sisä- ja ulkolämpötilan erotus. Yleisimmin käytetty lämmitystarveluku on S17, joka tarkoittaa, että ulkolämpötilan ja sisälämpötilan erotuksen laskemisessa käytetään sisälämpötilaa + 17 °C.

Normaalia lämpimämpien kuukausien kulutusta normeeratussa voi normeerattu kulutus olla moninkertainen todelliseen kulutukseen verrattuna. Normitetun energian moninkertaistuminen on yleistä etenkin syys- ja toukokuun kulutusta normeeratussa. Myös kesäkuukausina on mahdollista, että toteutunut lämmitystarveluku jää nollassa, jolloin kyseiseltä kuukaudelta voidaan käyttää

normeerattuna kulutustietona toteutunutta kulutusta. (Kulutuksen normitus auttaa kulutusseurannassa. 2016., 1-2.)

5.4 Kiinteistön lämmitystehontarve

Kiinteistön lämmitystehon tarve on riippuvainen pääsääntöisesti rakenteiden johtumislämpöhäviöistä, ilmanvaihdosta ja ilmanvuodoista. Rakennuksien lämmitysteho mitoitetaan vastaamaan paikkakunnan mitoituslämpötilaa. Suomessa käytettävät mitoituslämpötilat ovat -26 °C, -29 °C, -32 °C ja -38 °C. Suomi on jaettu neljään säävyöhykkeeseen, jotka määrittävät rakennuksen paikkakunta kohtaisen mitoitusulkolämpötilan. Suomen säävyöhykkeet on esitetty kuviossa 11. (Energiatehokkuus. 2018., 64)



Kuvio 11. Säävyöhykkeet ja mitoituslämpötilat (1010/2017 ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta., 17, muokattu)

Lämmitystehontarpeen määrittämisessä voidaan hyödyntää energiateollisuuden K1/2013 julkaisua, jossa on esitetty ohjeet vanhan asuinrakennuksen lämmönjakokeskuksen mitoitukselle. Ohjeen avulla voidaan laskea toteutuneiden energiankulutusten perusteella rakennukselle teoreettinen lämmityssiirtimen teho,

joka vastaa rakennuksen lämmitystehon tarvetta mitoittavassa ulkolämpötilassa. Ohje soveltuu käytettäväksi niissä asuinrakennuksissa, jossa ei ole tuloilman lämmityksellä varustettua koneellista ilmastointia. (Julkaisu K1/2013, 74.)

5.5 Varaajat

Lämpöpumppujärjestelmä toimii paremmin varaajan kanssa. Varaajan ansiosta lämpöpumpun käyntijaksot pitenevät. Tämän lisäksi lämpöpumpun lauhduttimella ja lämmönjakojärjestelmässä on usein käytössä suuruudeltaan eri virtaamat. Lämpimälle käyttövedelle ja tilojen lämmitykselle voidaan käyttää molemmille käyttötarkoituksille omia varaajia tai yhtä yhteistä varaajaa. (Laaksonen & Yrjölä. 2015., 8848)

Varaaja tarvitaan etenkin lämpimälle käyttövedelle, koska lämpimän käyttöveden lämmitystehon tarve on suuri ja lyhykestoinen. Käyttövesivaraajan ansiosta voidaan käyttöveden lämmitykseen varata pienempi lämmitysteho kuin käyttöveden lämmittämiseen tarvittava teho mitoitusvirtaamalla. Käyttövesivaraajan mitoitetaan yleensä vastaaman vuorokauden kulutusta. (Energiatehokkuus. 2018., 70)

Lämpimän käyttöveden lämpöenergian varaamisen lisäksi käyttövesivaraajalla on myös hygieniavaatimuksia. Talousveden mukana kiinteistön vesijärjestelmiin pääsee luonnossa esiintyviä legionella bakteereja, jotka voivat aiheuttaa keuhkokuumetta. Legionella bakteerit voivat lisääntyä lämpimän käyttöveden varaajassa, jos lämpimän käyttöveden lämpötila on liian alhainen. Legionella bakteerien torjumiseksi lämpimän käyttöveden lämpötilan tulisi pyrkiä pitämään + 55-60 °C välillä. (Legionella, ympäristötekijät ja torjuntamahdollisuudet. 2018)

5.6 Lämmönjakolaitteistossa käytettävät lämpötilat

Käytössä olevan lämmönjakojärjestelmän lämpötila vaikuttaa lämpöpumpun hyötysuhteeseen. Koska lämpöpumpun hyötysuhde on riippuvainen lämmönlähteen ja lämmöntuotto kohteen lämpötilatasosta on lämmönjakolaitteistossa käytettävällä lämpötilalla suurimerkitys lämpöpumpun hyötysuhteeseen. Tästä johtuen lämpö-

pumpulle parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi lämmönjakolaitteistossa tulisi hyödyntää mahdollisimman matalaa lämpötila tasoa. (Boles & Cengel. 2015, 615.)

Lämpöpumpuille paras lämmönjakotapa on vesikiertoinen lattialämmitys, jossa käytettävä menoveden lämpötila on enintään + 40 °C. Vesikiertoisessa patteriverkostossa, menoveden lämpötila on huomattavasti korkeampi verrattuna lattialämmitykseen. Patterijärjestelmissä käytetään jopa + 70 °C menoveden lämpötiloja. Saneerauskohteissa, jossa käytetään korkeita menoveden lämpötiloja, voidaan menoveden lämpötilaa laskea lisäämällä olemassa olevien pattereiden pinta-alaa tai täydentää lämmönjakolaitteistoa puhallinkonvektoreilla. (Lämpöä omasta maasta. 2012.)

5.7 Kiinteistön sähkönkulutuksen kasvu

Lämpöpumppujärjestelmä nostaa kiinteistön sähkökuormaa merkittävästi, mikä voi johtaa sähköliittymä johdon ja pääsulakkeen vaihtamiseen. Tämä tulee huomioida järjestelmän suunnitteluvaiheessa. Sähköliittymän tai sulakekoon muuttaminen lisää järjestelmän investointihintaa, mikä tulee huomioida hankintakustannuksissa. (Virta, J., & Pylsy P. 2011., 119)

6 Opinnäytetyön toteutus

Opinnäytetyössä tarkasteltavana kohteena oli Suomen Talotekniikka Energia Mikkelin Oy:n Kuopiossa sijaitseva saneerauskohte. Kohde on 1970-luvulla rakennettu kerrostalo, jossa on yhteensä 35 asuntoa. Suomen Talotekniikka asensi marraskuussa 2017 kohteeseen poistoilmalämmön talteenottojärjestelmän. Asennuksen yhteydessä uusittiin huippumurit sekä puhdistettiin poistoilmakanavat ja säädettiin poistoilmavirrat.

Kiinteistön lämmitysenergiankulutusta ja lämmitystehontarvetta tarkasteltiin ennen poistoilmalämpöpumppujen asennusta sekä asennuksen jälkeen. Lämmitysenergian kulutustietojen avulla pyrittiin arvioimaan kiinteistön eri kulutuskohteiden osuutta ja suuruutta kokonaisenergiankulutuksesta. Tarkasteltavia kulutuskohteita olivat

kiinteistön lämpimän käyttöveden kierron, lämpimän käyttöveden lämmitykseen sekä tilojen lämmitykseen käytetty energia. Tämän lisäksi kiinteistön lämmitysteho määritettiin tilojen lämmitykselle sekä lämpimälle käyttövedelle. Kiinteistön lämmitysjärjestelmän tilaa täytyi arvioida ennen ja jälkeen poistoilman lämmön talteenottojärjestelmän käyttöönottoa, jotta kohteeseen voitiin mitoittaa sinne sopiva maalämpöjärjestelmä.

Taloyhtiöllä on sähkö- ja kaukolämpösopimus Kuopion Energian kanssa. Kuopion Energia tarjoaa kaukolämpöverkossaan kausihinnoiteltua kaukolämpöä. Kohteen kulutustiedot saatiin Kuopion Energian Nokkela energiavahti palvelusta. Sähkön ja kaukolämmön kulutustietoja voitiin tarkastella tunti-, päivä-, kuukausi- ja vuositasolla vuosien 2014 - 2018 ajalta. Kaukolämmöstä oli myös saatavilla kaukolämmön tulo- ja paluulämpötilat. Lämpöpumppujen tuotto- ja prosessidata saatiin lämpöpumppuvalmistajan etäkäyttöpalvelusta.

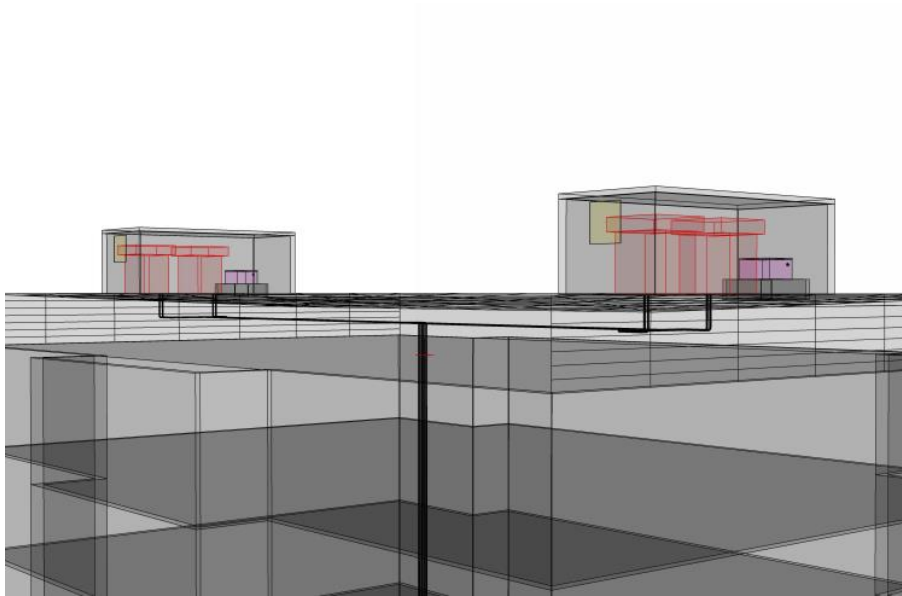
6.1 Kiinteistön lämmitystekniset laitteet

Kiinteistön nykyinen lämmitysjärjestelmä on kaukolämmön ja poistoilmalämpöpumppujen hybridiratkaisu. Poistoilmalämpöpumput on kytketty kaukolämpölaitteistoon K1-julkaisun mukaisesti. Poistoilmalämpöpumput ovat siis rinnan kytketty kaukolämmönvaihtimien kanssa, jolloin lämpöpumput vaikuttavat mahdollisimman vähän kaukolämmön jäähtymään.

Poistoilmalämpöpumput sijaitsevat kiinteistön katolla niille rakennetuissa kopeissa. Koppeja on katolla kaksi. Molemmissa kopeissa on kaksi lämpöpumppua. Näihin koppeihin kiinteistön poistoilma imetään koppeihin huippuimureilla.

Poistoilmalämpöpumppuina käytetään ilmavesilämpöpumppuja, jotka ottavat energiansa koppeihin imettävästä poistoilmasta. Poistoilmalämpöpumput ovat on/off-säätöisiä ja niissä käytetään EVI-lämpöpumpputekniikkaa. Poistoilmalämpöpumpuista kaksi tuottaa lämpöä sekä rakennuksen lämmitykseen että lämpimän käyttöveden lämmittämiseen. Käyttövettä tuottavat lämpöpumput toimivat vaihtelevalla lauhdutuksella eli ne vaihtelevat käyttöveden lämmittämisen ja

rakennuksen lämmittämisen välillä tarpeen mukaan. Lämpöpumput kykenevät tuottamaan + 60 °C menoveden lämpötilaa. Poistoilmalämpöpumpuilla tuotettu lämpö siirtyy katolta lämmönjakohuoneeseen porraskäytävässä kulkevaa lämmönsiirtoputkistoa pitkin. Järjestelmän toteutusta on havainnollistettu kuviossa 12.



Kuvio 12. Poistoilmalämpöpumput, kopit ja keruuputkisto

Lämpöpumppujen käyntiajan pidentämiseksi lämmönjakohuoneessa on lämpimän käyttöveden varaaja ja lämmityksen puskurivaraaja. Varaajat ovat samankokoisia ja niiden tilavuudet ovat 1,5 m³.

Lämmönjakokeskuksen kaukolämmön käyttövedenvaihtimen mitoitusteho on 225 kW ja lämmitysvaihtimen 175 kW. Kaukolämpölaitteistossa käytetään välisyöttökytkentää. Välisyöttökytkentä parantaa kaukolämmön jäähtymää kaukolämpölaitteistossa, jolloin kaukolämmön paluu lämpötila on alhaisempi.

Kiinteistössä on vesikiertoinen patterilämmitys. Pattereiden mitoituslämpötila on 70°C /40°C mikä tarkoittaa, että mitoituslämpötilassa patteriverkoston menevän veden lämpötila on +70 °C ja palaavan veden lämpötila on +40 °C. Kohteessa käytetään kuitenkin todellisuudessa matalampaa verkoston lämpötilaa.

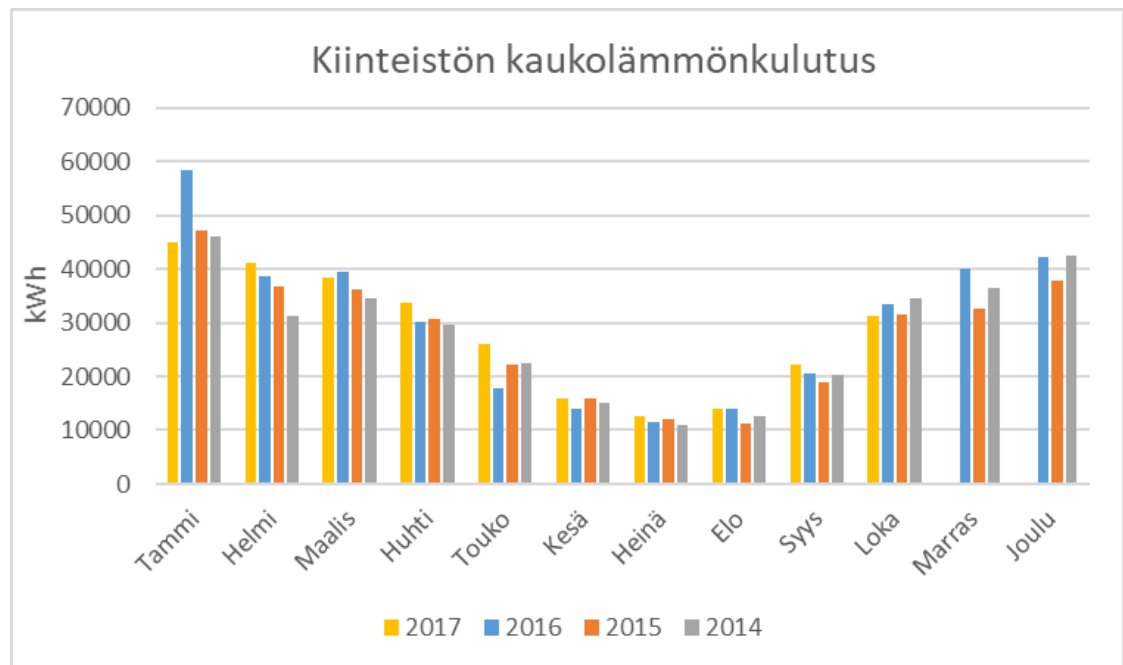
Kiinteistön lämpimän käyttöveden kiertojohtoon on liitetty lämmityslaitteita. Lämmityslaitteita on kiinteistön jokaisessa asunnossa, joten kiertojohdon lämmityslaitteiden määrä on 35 kappaletta. Kiertojohtoon liitetetyt lämmityslaitteet tuottavat taiseisen lämpökuorman ulkolämpötilasta riippumatta.

6.2 Kiinteistön lämmitysjärjestelmän tila ennen saneerausta

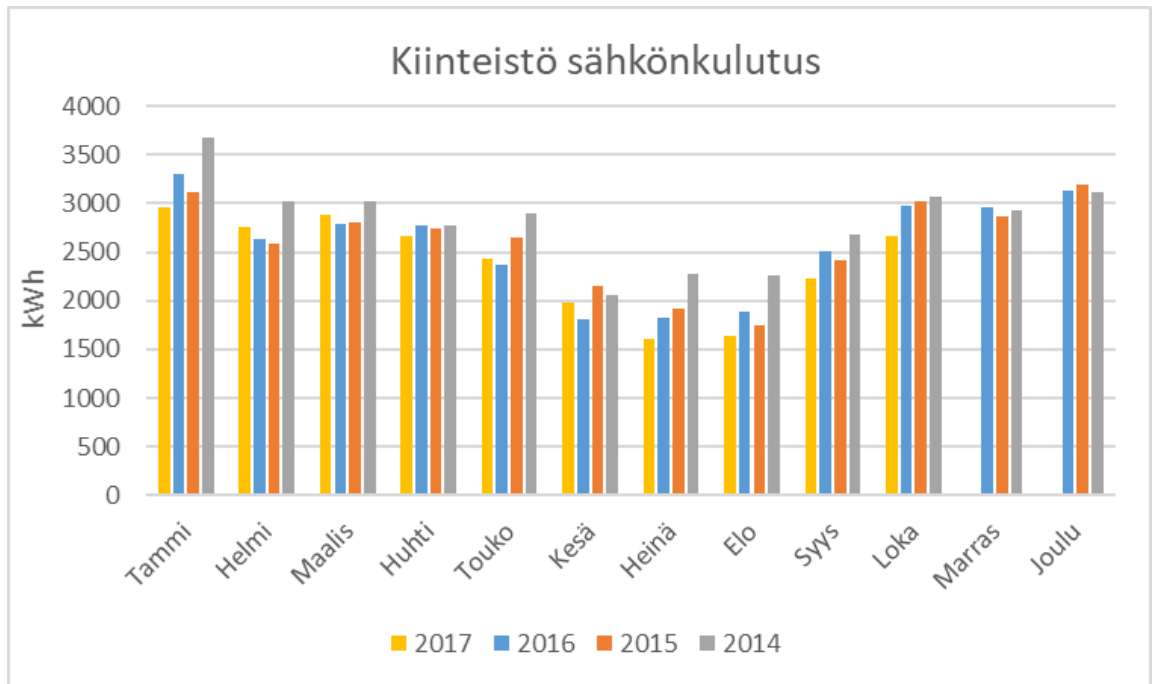
6.2.1 Kiinteistön energiankulutus

Kiinteistön lämmitysenergiankulutusta ennen saneerausta tarkasteltiin vuosien 2014 - 2017 kulutustietojen avulla. Vuoden 2017 kulutustietoihin vaikutti poistoilmanlämmön talteenottojärjestelmän käyttöönotto marraskuussa, joten sitä ei käytetty vuotuisen energiantarpeen tarkastelussa.

Kaukolämmön toteutunut vuosikulutus vaihteli välillä 330 - 350 MWh ja sähkön vuosikulutus vaihteli välillä 30 - 33 MWh. Kuvioissa 13 ja 14 on esitetty kaukolämmön ja sähkön kulutuksen vaihtelu kuukausitasolla.



Kuvio 13. Kiinteistön kaukolämmön kuukausikulutukset vuosina 2014 - 2017



Kuvio 14. Kiinteistön sähkön kuukausikulutukset vuosina 2014 - 2017

Käyttöveden lämmittäminen

Kiinteistön käyttöveden lämmittämiseen tarvittava energia koostuu lämpimän käyttöveden kierron lämpöhäviöstä ja lämpimän käyttöveden kulutuksesta. Käyttöveden lämmittämiseen tarvittavan energian suuruutta voitiin arvioida laskennallisesti sekä toteutuneiden kulutusten perusteella. Heinäkuussa kaukolämmöllä lämmitetään pääasiassa lämmintä käyttövettä, sillä ulkolämpötila on niin korkea, ettei tilojen lämmitystarvetta juurikaan ole.

Käyttöveden kierto

Käyttöveden kierron osuutta tarkasteltiin laskennallisesti sekä toteutuneen kulutuksen perusteella. Laskennallisessa tarkastelussa laskettiin kiertojohdolle ominaislämpöteho.

Käyttöveden kierron lämpöhäviö laskettiin kaavalla 4. (Energiatehokkuus. 2018., 46)

$$Q_{lkv} = (P_{lkv,kiertohäviö} L_{lkv} + P_l n) \frac{t_{lkv} 365}{1000} \quad (4)$$

missä Q_{lkv} lämpimän käyttöveden kierron vuotuinen lämpöhäviö, kWh

$P_{lkv,kiertohäviö}$ kiertojohdon ominaislämpöhäviö, kW

L_{lkv} lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus, m

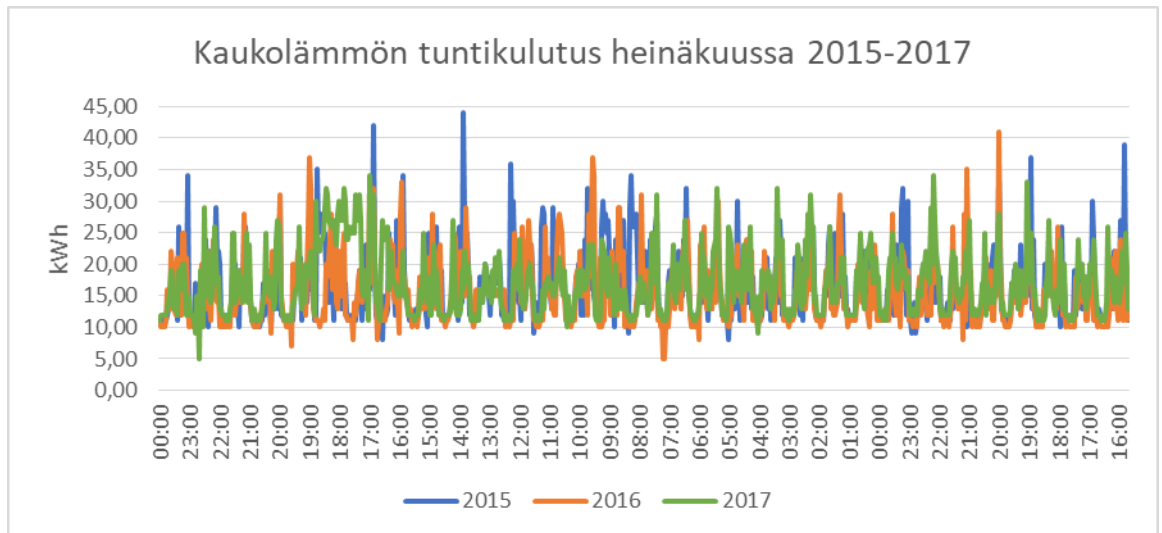
$P_{lämmityslaitte}$ kiertojohdon lämmityslaitteiden ominaisteho, kW

n lämmityslaitteiden lukumäärä

t_{lkv} kiertopumpun käyntiaika, h

Kiertojohdon pituus laskettiin rakennustyyppikohtaisien ominaiskertoimien avulla. Asuinrakennukselle kiertojohdon ominaiskerroin on $0,2 \text{ m/m}^2$. Kiertojohdon ominaiskerroin kerrotaan rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla, josta saadaan kiertojohdonpituudeksi 456 m. Kiertojohtoon liitettyjen lämmityslaitteiden määrä on 35, sillä jokaisessa asunnossa on yksi pyyhekuivain suihkutilassa. Kiertojohdon lämmityslaitteille voidaan käyttää lämmitystehona 200 W, jos tarkempaa arvoa ei ole tiedossa. Kiertojohto on eristetty suojaputkella, joten sen ominaishäviö on 15 W/m . Lämpimän käyttöveden kierto on jatkuvasti päällä, joten pumpun käyntiaikana käytetään arvoa 24. Kiertojohdon ominaislämpötehoksi saadaan tällöin $13,8 \text{ kW}$ ja vuosikulutukseksi $112\,000 \text{ kWh}$.

Toteutuneiden kaukolämmön kulutuksien perusteella voitiin arvioida käyttöveden kierron osuutta tarkastelemalla kaukolämmön tuntikulutuksia. Kuviossa 15 on esitetty, kuinka kaukolämmön tuntikulutus käyttäytyy viikon aikana. Kuviossa on esitetty tuntikulutukset vuosien 2015-2017 heinäkuulta.



Kuvio 15. Kaukolämmön tuntikulutus heinäkuussa 2015 - 2017

Kuviosta 15 voidaan havaita, että kaukolämmön tuntikulutus ei laske alle 10 kWh:n. Koska käyttöveden kierto on jatkuvasti päällä, aiheuttaa se jatkuvan ja tasaisen lämpöhäviön. Tästä johtuen on syytä olettaa käyttöveden kierron lämpöhäviöksi vähintään 10 kW. Käyttöveden kierron vuosikulutus 10kW:n jatkuvalla teholla on 87 600 kWh.

Laskennallisen ja toteutuneen kulutuksen perusteella on huomattava ero.

Laskennallisen kulutuksen suurempaan arvoon vaikuttaa olennaisesti se, että kiertojohtoon todellista pituutta ei ollut tiedossa, jolloin kiertojohtoon pituus saattoi osoittautua todellista pidemmäksi ja lisätä näin kiertojohtoon lämpöhäviötä.

Käyttöveden kulutus

Käyttöveden kulutus arvioitiin veden kokonaiskulutuksen avulla. Veden kokonaiskulutus arvioitiin käyttämällä Motivan ilmoittamaa keskimääräistä vedenkulutusta. Keskimääräinen vedenkulutus jokaista asukasta kohden on 155 l/vrk, josta 40 % on lämmintä käyttövettä. Asukastiheydeksi arvioitiin 1,3 asukasta asuntoa kohden, jolloin asukkaiden määräksi saadaan 46 henkilöä. Lämpimän käyttöveden vuosikulutukseksi saatiin näillä tiedoilla 930 m³.

Käyttöveden lämmittämiseen tarvittava energia laskettiin luvussa 5.2 esitetyllä kaavalla 2. Käyttöveden vuotuiseksi energiankulutukseksi arvioitiin siis 56,5 MWh.

Tilojen lämmitys

Tilojen lämmittämiseen tarvittavan energia arvioitiin kaukolämmön kokonaisenergiankulutuksen, käyttöveden lämmittämiseen ja kiertojohdon lämpöhäviön avulla. Kokonaisenergiankulutuksesta voidaan vähentää lämpimän käyttöveden lämmittämiseen ja kiertojohdon häviöön tarvittava energia, jolloin jäljelle jää tilojen lämmitykseen tarvittava energia.

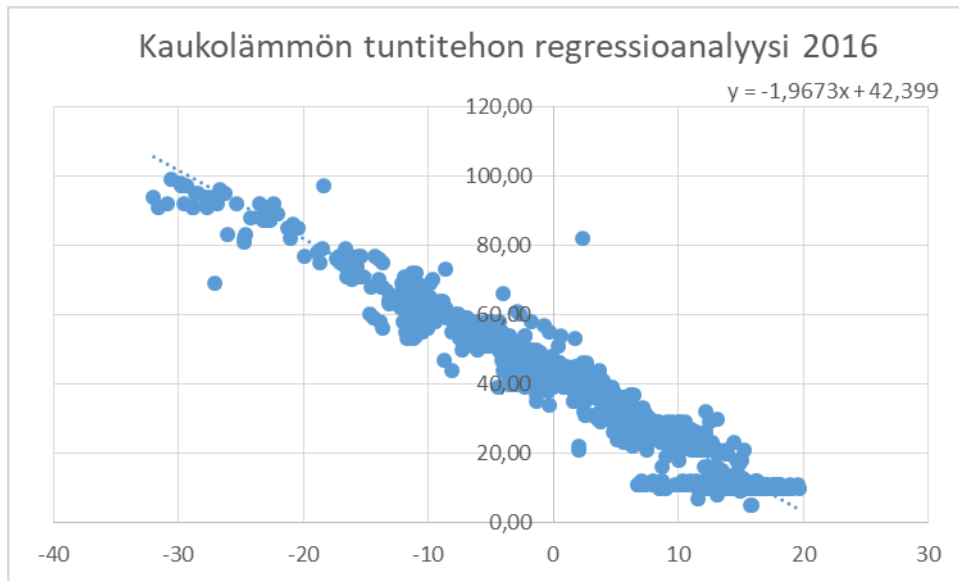
6.2.2 Kiinteistön lämmitystehon tarve

Tilojen lämmityksen tehontarve

Tilojen lämmityksen tehontarve määritetään toteutuneiden kulutuksien regressioanalyysillä sekä energiateollisuus ry:n K1/2013 julkaisun vanhan asuinrakennuksen lämmönjakokeskuksen mitoitus ohjeen mukaisesti. (Julkaisu K1/2013, 74)

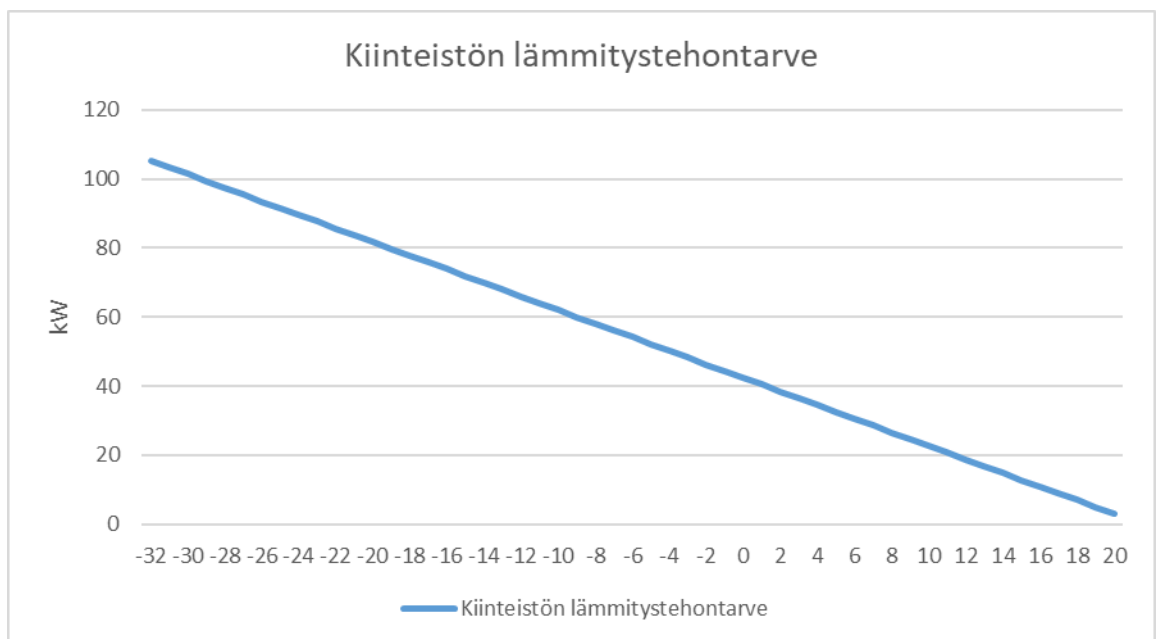
Tehontarpeen arviointi kahdella eri menetelmällä takaa luotettavamman tuloksen.

Kiinteistön tilojen lämmitystehon tarvetta analysoitiin regressiomenetelmällä. Regressiomenetelmässä kaukolämmön tuntiteho ja tunnin keskimääräinen ulkolämpötila sijoitettiin Excel-taulukkoon. Pisteiden perusteella piirrettiin viiva, jonka yhtälöllä voitiin laskea kiinteistön lämmitystehon tarve halutussa ulkolämpötilassa. Analyysissa käytettiin vuoden 2016 kulutustietoja. Analyysiin valittiin vain tuntikohtaiset tiedot klo 2-5 väliltä, koska voitiin olettaa, että tällä ajanjaksolla lämpimän käyttöveden kulutus ei aiheuta suuria muutoksia lämmitystehoon.



Kuvio 16. Kaukolämmön regressioanalyysi

Kuviosta 16 voidaan havaita, että lämmitystarve kasvaa lineaarisesti ulkolämpötilan laskiessa. Pisteiden perusteella voitiin laatia trendiviiva, josta saatiin yhtälö. Yhtälön perusteella kiinteistön lämmitystehoksi saatiin 105 kW. Kuviossa 17 on esitetty regressioanalyysillä saadusta yhtälöstä muodostettu suora.



Kuvio 17. Kiinteistön lämmitystehontarve suhteessa ulkolämpötilaan

Kiinteistön lämmitystehon tarve laskettiin myös energiateollisuuden K1/2013 julkaisussa esitetyllä vanhan rakennuksen lämmitystehon arviointimenetelmällä.

Lämmitysteho laskettiin kolmelta vuodelta (2014 - 2016). Laskennassa käytetty kaava on esitetty liitteessä 1.

Käyttövesipattereihin liitettyjen lämmityslaitteiden energian kulutus laskettiin kertomalla lämmityspattereiden ominaisteho vuoden tunneilla.

$$Q_{lkv,pat} = 7 \text{ kW} * 8760 \text{ h} = 61\,320 \text{ kWh/v} = 5\,110 \text{ kWh/kk}$$

Käyttöveden lämmitykseen käytetty energia määritettiin vähentämällä kesäkuukausien keskimääräisestä energiankulutuksesta lämmityspatterien energiankulutus.

$$Q_{lkv} = 11\,754 \text{ kWh} - 5\,110 \text{ kWh} = 6\,644 \text{ kWh}$$

$$Q_{lkv} = 6\,644 \text{ kWh} * 12 \text{ kk} = 79\,728 \text{ kWh}$$

Laskentaohjeessa pyydetään tarkastamaan rakennuksen lämpöindeksi. Kiinteistön lämpöindeksi lasketaan jakamalla normeerattu energiankulutus rakennustilavuudella.

$$\frac{376\,000 \text{ kWh}}{8760 \text{ m}^3} = 42,3 \text{ kWh/m}^3$$

Seuraavaksi lasketaan rakennuksen lämmityksen huipunkäyttöaika kaavalla 5.

$$H = \frac{24 * S}{17 - t_u} \quad (5)$$

missä H on huipunkäyttöaika, h

S on normaalivuoden lämmitystarveluku, °Cd

t_u on mitoitusulkolämpötila, °C

Kaavalla 5 laskettuna huipunkäyttöajaksi saadaan 2363,5 tuntia.

Lämmitysenergian tarve lasketaan vähentämällä normitetusta energiankulutuksesta käyttöveden kierron ja käyttöveden lämmitykseen käytetty energia.

$$Q_{ls} = 376\,900 \text{ kWh} - 79\,728 \text{ kWh} - 61\,320 \text{ kWh} = 241\,300 \text{ kWh}$$

Lämmitystehontarpeeksi saadaan jakamalla lämmitysenergiatarve huipunkäyttöajalla.

$$\Phi_{2016} = \frac{241\,300 \text{ kWh}}{2363,5 \text{ h}} = 102,1 \text{ kW}$$

$$\Phi_{2015} = \frac{239\,000 \text{ kWh}}{2363,5 \text{ h}} = 101,1 \text{ kW}$$

$$\Phi_{2014} = \frac{223\,400 \text{ kWh}}{2363,5 \text{ h}} = 94,5 \text{ kW}$$

Rakennuksen ominaistehon voidaan laskea jakamalla saatu lämmitysteho rakennuksen tilavuudella.

$$\Phi_{\text{ominais},2016} = \frac{102,1 \text{ kW}}{8760 \text{ m}^3} = 11,65 \text{ W/m}^3$$

$$\Phi_{\text{ominais},2015} = 11,54 \text{ W/m}^3$$

$$\Phi_{\text{ominais},2014} = 10,79 \text{ W/m}^3$$

Ominaistehon suuruusluokka on laskettuna noin $11,5 \text{ W/m}^3$, joka on vähemmän kuin vastaavan ikäisillä rakennuksilla yleensä. Kuitenkin laskettu teho vastaa regressioanalyysillä saatua lämmitystehon tarvetta, jonka perusteella on syytä olettaa saadun lämmitysteho olevan lähellä todellisuutta.

Käyttövedenlämmityksen tehontarve

Käyttövedenlämmityksen tehontarve määritettiin selvittämällä mitoitusvirtaama normivirtaamien avulla lämpimän käyttöveden jakojohdossa. Normivirtaamat laskettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman D1 mukaisella ohjeistuksella (RakMK D1. 2007, 35 - 37). Lämpimän käyttöveden normivirtaama oli 0,5 dm³/s jokaista asuntoa kohden. Normivirtaamien summaksi saatiin 17,5 dm³/s. Tämän jälkeen mitoitusvirtaama voitiin lukea taulukosta, josta lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaamaksi saatiin 1,17 dm³/s.

Lämpimän käyttöveden lämmitysteho voidaan laskea lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaaman avulla. Käyttöveden mitoituksessa tulevan veden lämpötilana voidaan käyttää +10 °C ja lämmitetylle vedelle + 58 °C.

Käyttöveden mitoitusvirtaamaa vastaava lämmitysteho voidaan laskea kaavalla 6.

$$P_{kv} = \dot{V} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \Delta T \quad (6)$$

Jossa P_{kv} käyttöveden mitoitusvirtaamaa vastaava lämmitysteho, kW

\dot{V} käyttöveden tilavuusvirta, dm³/s

C_p veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg·K

ρ vedentiheys, kg/m³

ΔT lämpötilanmuutos, K

Kaavalla 6 laskettuna käyttöveden mitoitusvirtaamaksi saatiin 233 kW.

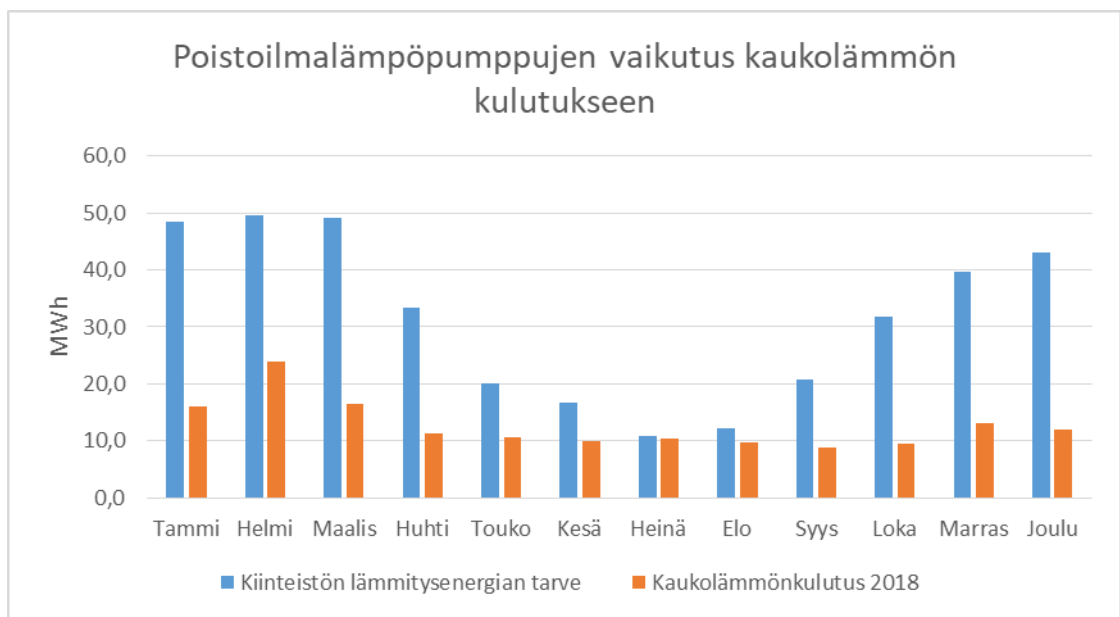
6.3 Kiinteistön lämmitysjärjestelmätila saneerauksen jälkeen

6.3.1 Poistoilmalämpöpumpujen vaikutus kaukolämmön kulutukseen

Poistoilmalämpöpumput vähentävät kiinteistön kaukolämmön kulutusta.

Kaukolämmön kulutus oli ennen poistoilmalämpöpumppu asennusta 330 - 360 MWh

vuosina 2014 - 2016. Vuonna 2018 kaukolämmön kulutus oli 152 MWh ja vuotuinen lämmitystarveluku oli Kuopiossa 4455. Vuonna 2016 kaukolämmönkulutus oli 360 MWh ja vuotuinen lämmitystarveluku oli 4436 (Lämmitystarveluku. n.d.). Vuosien 2018 ja 2016 lämmitystarveluvut olivat lähes samansuuruiset. Tästä johtuen näiden vuosien lämmönkulutukset ovat säähän nähden vertailukelpoisia. Näiden vuosien kaukolämmönkulutusta vertailtaessa voidaan huomata, että kiinteistön kaukolämmönkulutus on tippunut noin 208 MWh.

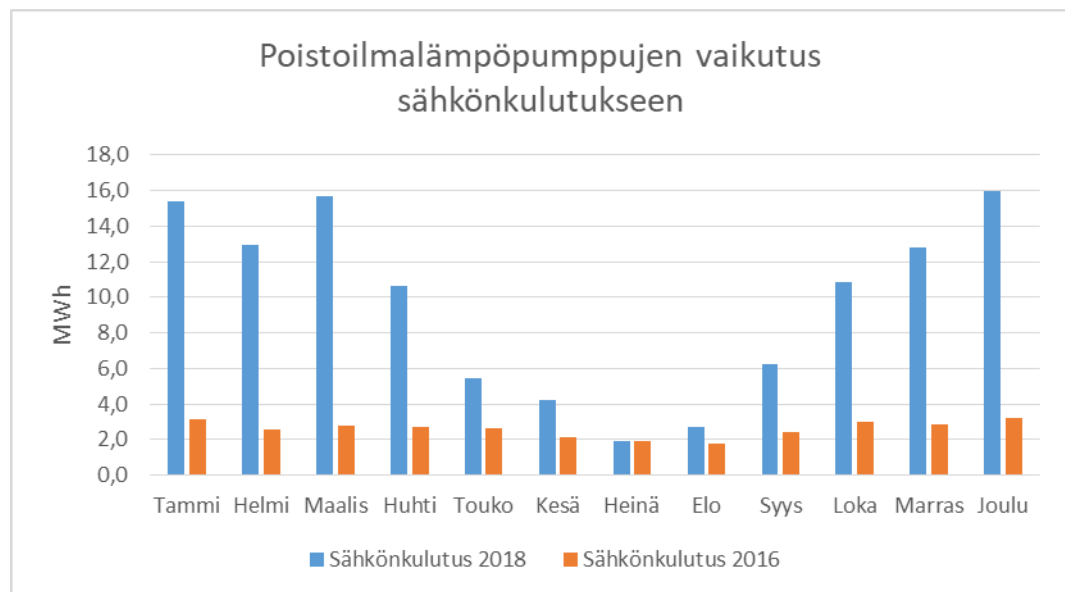


Kuvio 18. Poistoilmalämpöpumppujen vaikutus kaukolämmön kulutukseen

Kuviosta 18 voidaan havaita, että poistoilmalämpöpumput tuottavat merkittävän osan kiinteistön lämmitysenergian tarpeesta lämmityskauden aikana. Kuviossa kiinteistön lämmitysenergian tarpeena on käytetty kohteen normeerattuja kaukolämmön kuukausikulutuksia. Kuvasta on havaittavissa, että kaukolämmön kuukausikulutus on usean kuukauden aikana ollut kesäkuukausien kulutusta vastaavalla tasolla. Koska poistoilmalämpöpumpuilla ei tuoteta lämpöä käyttöveden kierron tarpeisiin, on jäljelle jäävä kaukolämmön osuus pääasiassa käyttöveden kierron lämpöhäviöitä.

6.3.2 Poistoilmalämpöpumpujen vaikutus sähkönkulutukseen

Poistoilmalämpöpumput lisäävät kiinteistön sähkönkulutusta merkittävästi. Kiinteistön sähkönkulutus oli vuosina 2014 - 2016 30 - 33 MWh. Vuonna 2018 sähkönkulutus oli 115 MWh. Kiinteistön sähkönkulutus kasvoi poistoilmalämpöpumpujen aseenuksien myötä 84 MWh. Kuviossa 19 on esitetty kiinteistön sähkönkulutus vuonna 2018 ja 2016.

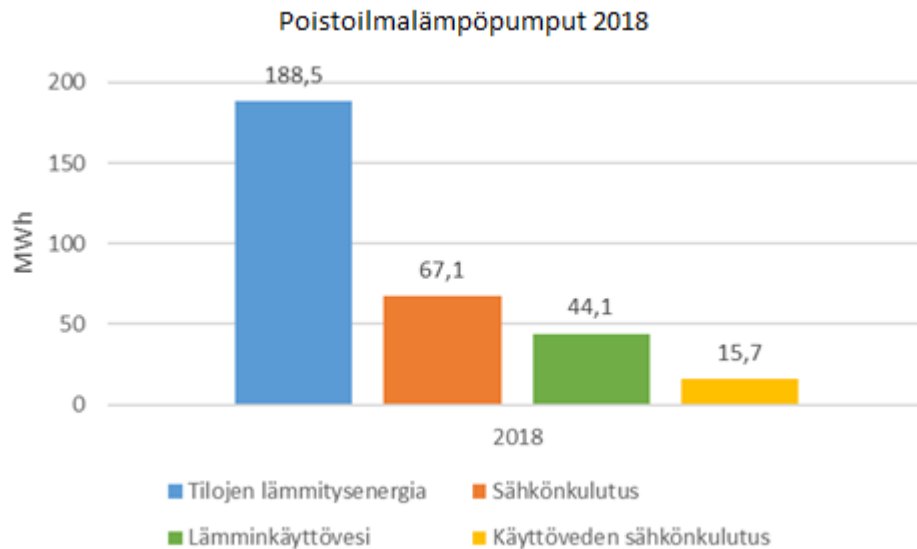


Kuvio 19. Kohteen kuukausittaiset sähkönkulutukset vuosilta 2016 ja 2018

Kuviosta 19 voidaan havaita, että poistoilmalämpöpumpujen sähkönkulutus vaihtelee kiinteistön lämmitystarpeen mukaan.

6.3.3 Poistoilmalämpöpumpujen vuosihyötysuhde

Poistoilmalämpöpumpuilla tuotettiin vuonna 2018 232 MWh energiaa, josta 82,8 MWh oli poistoilmalämpöpumpujen kuluttamaa sähköä. Poistolämpöpumpuilla otettiin siis talteen poistoilmasta ilmaisen energiaa 149,2 MWh. Kuviossa 20 on esitetty poistoilmalämpöpumpujen kulutus- ja tuottotiedot.



Kuvio 20. Poistoilmalämpöpumppujen käyttämä sähkö ja tuotettu lämpö

Poistoilmalämpöpumppujen vuotuinen hyötysuhde voitiin laskea kaavalla 7.

$$SCOP = \frac{Q_H}{W_{in}} \quad (7)$$

missä SCOP lämpöpumpun vuosihyötysuhde

Q_H lämpöpumpulla tuotettu energia, MWh

W_{in} lämpöpumpun käyttämä sähkö, MWh

Kaavalla 7 laskettuna lämpöpumpun vuosihyötysuhteeksi saadaan 2,8.

6.3.4 Käyttöveden tuottaminen poistoilmalämpöpumpuilla

Kiinteistön neljästä poistoilmalämpöpumpuista kahta voidaan käyttää sekä lämpimän käyttöveden tuottamiseen että tilojen lämmitykseen. Käyttövettä tuottavat lämpöpumput toimivat vaihtelevalla lauhtuksella, joka tarkoittaa sitä, että lämpöä tuotetaan tilojen- ja käyttöveden lämmitykseen vuorotellen.

Poistoilmalämpöpumput tuottavat käyttövettä käyttövesivaraajan lämpötilan laskiessa alle tavoite lämpötilan.

6.3.5 Poistoilmalämpöpumppujen lämmitysteho

Poistoilmavirran energiasisällön tarkistaminen mitoitusulkolämpötilassa voidaan suorittaa tarkastelemalla poistoilmasta hyödynnettävän energian määrää. Poistoilmasta hyödynnettävään energiaan vaikuttaa poistoilman kosteus, ilmavirta ja lämpötila.

Poistoilman lämpötilan oletetaan pysyvän + 21 °C:ssa ja ilmankosteudeksi oletetaan RH 20 %. Ilmankosteudeksi valitaan mahdollisimman pieni arvo, jotta varmistetaan poistoilman energiasisällön riittävydestä mitoitus tilanteessa, sillä talvisin sisäilman kosteus vaihtelee välillä 20 - 40 % (Sisäilman kosteus. n.d).

Poistoilmavirta määritetään laskennallisesti käyttäen asuinrakennuksen ulkoilmavirran mitoituksessa käytettävää vähimmäiskerrointa 0,35 (dm³/s)/m² (A 1009/2017. 9 §). Rakennuksen poistoilmavirta voidaan laskea kaavan 8 mukaisesti.

$$q_v = 0,35 \text{ (dm}^3\text{/s)/m}^2 \cdot A \quad (8)$$

missä q_v = Poistoilmavirta, m³/s

0,35 (dm³/s)/m² Ilmanvaihtokerroin, (dm³/s)/m²

A Lämmitetty nettoala, m²

3600 kerroin, jolla muutetaan yksiköksi m³/s

Rakennuksen poistoilmavirraksi saadaan kaavalla 8 laskettuna $q_v = 788,7 \text{ dm}^3\text{/s}$.

Poistoilman energiasisältöä voidaan arvioida Mollier- diagrammin avulla. Mollier-diagrammi liitteessä 6. Mollier-diagrammissa on esitetty ilman ilmankosteuden ja lämpötilan vaikutus ilman entalpiaan. Poistoilman entalpia voidaan lukea Mollier-diagrammista seuraamalla oletettua poistoilman lämpötilan viivaa (+21 °C) siihen kohtaan asti, jossa se leikkaa oletetun ilmankostetta kuvaavan viivan (RH 20 %). Viivojen leikkauskohdasta seurataan alaviistoon kulkevaa entalpia viivaa, josta saadaan ilman entalpiaksi 28 kJ/kg. Poistoilman oletetaan jäähtyvän -7 °C asteiseksi

mitoitustilanteessa jolloin, voidaan jäähtyneen ilman entalpia lukea seuraamalla -7 °C asteen lämpötilaviivaa kyllästysviivaan asti, josta saadaan entalpiaksi noin -2 kJ/kg . Entalpia eroksi saadaan siis $\Delta h=30\text{ kJ/kg}$.

Poistoilmasta hyödynnettävä lämmitysteho voidaan laskea seuraavalla kaavalla 9.

$$P_{p,ilma} = q_v * \rho * \Delta h \quad (9)$$

missä $P_{p,ilma}$ = poistoilmasta hyödynnettävä teho, kW

q_v = Poistoilmavirta, m^3/s

ρ = Ilman tiheys, kg/m^3

Δh = entalpia ero, kJ/kg

Poistoilmasta hyödynnettäväksi tehoksi saadaan kaavalla 9 laskettuna $28,75\text{ kW}$.

Koska lämpöpumpun tuottama lämpöenergia koostuu lämmönlähteestä saatavasta energiasta ja lämpöpumpun kuluttamasta sähköstä, tulee laskettuun poistoilmasta hyödynnettävään lämmitystehtoon lisätä lämpöpumpun käyttämä sähkön osuus.

Mitoitustilanteessa kiinteistön patteriverkoston menoveden lämpötila on yli $+60\text{ °C}$. Tästä johtuen riittävän lauhtumislämpötilan saavuttamiseksi täytyy lämpöpumpun kompressorilla nostaa kylmäaineen paine korkeaksi, josta johtuen lämpöpumpun hyötysuhde on alhainen.

Liitteessä 2 on esitetty käytössä olevien poistoilmalämpöpumppujen lämmityskaaviot. Lämmityskaavioista voidaan lukea lämpöpumppujen teoreettiset tuottotiedot eri lämmönlähteen ja tuotettavan lämpötilan mukaan. Taulukosta voidaan lukea lämpöpumpun teoreettinen hyötysuhde sekä lämmöntuottoteho. Kuvasta nähdään, että -7 °C lämmönlähteen lämpötilalla lämpöpumppu tuottaa $+60\text{ °C}$ menoveden lämpöä hyötysuhteella 2,0 (COP) noin 14 kW teholla.

Teoreettisesti lämpöpumpulla hyödynnettävä lämmitysteho mitoituskolämpötilassa voidaan laskea seuraavalla kaavalla 10.

$$P_{tot} = P_{p,ilma} + \frac{P_{p,ilma}}{(COP-1)} \quad (10)$$

Missä P_{tot} Teoreettisesti lämpöpumpulla hyödynnettävä lämmitysteho, kW

$P_{p,ilma}$ Poistoilmasta hyödynnettävä lämmitysteho, kW

COP lämpöpumppujen hyötysuhde + 60 °C menovirtaamalle

Kaavalla 10 laskettuna teoreettiseksi poistoilmalämpöpumppujen lämmitystekoksi saadaan 57,5 kW. Liitteen 3 mukaan poistoilmalämpöpumpuilla voidaan kuitenkin tuottaa lämmönlähteen -7 °C lämpötilalla vain noin 14 kW lämmitystehoa. Kaikkien neljän poistoilmalämpöpumpun yhteislämmitystekoksi saadaan tällöin 56 kW.

7 Tulokset

7.1 Maalämpöjärjestelmän mitoitus

7.1.1 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumpulla tulisi kattaa kiinteistön lämmitystarve, jota poistoilmalämpöpumpuilla ei voida tuottaa. Maalämpöä tarvittaisiin siis käyttöveden kierron lämmittämiseen sekä kovilla pakkasilla kulutushuippujen kattamiseen. Tästä johtuen lämpöpumpulla on tehtävä korkeata lämpötilatasoa, josta johtuen valittavan maalämpöpumpun täytyy pystyä tuottamaan +65 °C. Lämpöpumpuilla korkean lämpötilan tuottaminen johtaa matalaan hyötysuhteeseen, jos lämmönlähteenä käytetään energiakaivoa.

Käyttöveden kierron jatkuvaksi lämpöhäviöksi arvioitu vähintään 10 kW, joka ongelmallinen maalämpöpumppu valinnan kannalta, koska kuorma on jatkuva ja sen tuottamiseen tarvitaan korkea lämpötilataso. Lisäksi valittavan maalämpöpumpun huipputehon tuoton tulisi olla vähintään 50 kW.

Lämpöpumpuiksi valittiin kaksi lämpöpumppua, joista toisen teho oli 40 kW ja toisella 25 kW. Lämpöpumppuja otettiin kaksi erisuuruista yhden ison sijasta, jotta kompressorien käyntiaikoja saataisiin pidennettyä. Yhdellä suurella isotehoisella lämpöpumpulla käyntiajat jäisivät lyhyiksi.

7.1.2 Energiakaivon mitoitus

Energiakaivot mitoitettiin kattamaan energiankulutus, jota ei tuoteta poistoilmalämpöpumpuilla. Poistoilmalämpöpumppujen ansiosta kaukolämmön kulutus väheni noin 60 % prosenttia vuonna 2018 aikaisempiin vuosiin verrattuna. Energiakaivojen mitoituksessa oletetaan, että poistoilmalämpöpumpuilla tuotetaan ainakin 60 % kiinteistön kokonaislämpöenergiasta. Kiinteistön kokonaislämmitysenergiana käytetään 368 MWh.

Energiakentän mitoituksessa maalämpöpumpun hyötysuhteeksi arvioidaan 3, joka tarkoittaa, että energiakaivosta otetaan kaksi kolmasosaa lämmitykseen tarvittavasta energiasta.

Lämpökaivosta tarvittavan energianmäärä voidaan laskea kaavalla 11.

$$Q_{kaivo} = Q_{kok} \cdot 0,4 \cdot 0,66 \quad (11)$$

missä Q_{kaivo} energiakaivoista otettava energia, MWh

Q_{kok} kiinteistön kokonaislämmitysenergiankulutus, MWh

0,4 kerroin, jolla saadaan maalämmöllä tuotettavan energianosuus

0,66 kerroin, jolla saadaan energiakaivoista saatavan energian osuus

Kaavalla 11 laskettuna energiakaivoista tarvitaan vuositasolla siis 97,15 MWh energiaa.

Energiakaivon mitoituksessa käytetään energiakaivosta otettavan vuotuisen energian määränä 70 kWh/m. Energiakaivon tarvittavan energiakaivojen tehollisen syvyyden tulisi olla silloin 1388m.

7.1.3 Käyttövesivaraajan mitoitus

Kiinteistön lämpimän käyttöveden saatavuuden varmistamiseksi lämpöpumppujen avulla tarvitsee nykyistä käyttövesivaraaja kapasiteettia nostaa. Yleisesti ottaen käyttövesivaraajat mitoitetaan vastaamaan vuorokautista lämpimän käyttöveden kulutusta.

Kiinteistön käyttöveden mitoitusvirtaamaa vastaava lämmitysteho on 233 kW. Lämpimän käyttöveden varaajan kapasiteetti suunnitellaan niin, että varaajasta saadaan lämmintä vettä mitoitusvirtaamalla 15 minuutin ajan.

Varaajasta tarvittavan energiamäärä mitoitusvirtaamalla 15 minuutin kulutuksen aikana voidaan laskea kaavalla 12.

$$Q_{mit} = P \cdot t \quad (12)$$

missä Q_{mit} varaajaan varattava energia, kWh

P mitoitusvirtaamaa vastaava lämmitysteho, kW

t aika kuinka pitkään mitoitusvirtaamalla käytetään vettä, h

Kaavalla 12 laskettuna käyttövesivaraajan energian tarpeeksi saadaan 58,25 kWh.

Käyttövesivaraajalle riittävä tilavuus voidaan laskea kaavalla 13.

$$V = (Q_{mit} \cdot 3,6) / (C_P \cdot \rho \cdot (t_2 - t_1)) \quad (13)$$

missä V varaajan tilavuus, m³

Q_{mit} varaajan varttava energia, kWh

C_p veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg·K

ρ veden tiheys, kg/m³

t_1 käyttövesivaraajan lämpötila (60 °C), K

t_2 lämpötila johon varaajan lämpötila laskee (40 °C), K

3,6 kerroin, jolla tehdään yksikkö muunnos kWh->kJ

Kaavalla 13 laskettuna käyttövesivaraajan tilavuudeksi saadaan 2,5 m³.

7.1.4 Kiinteistön sähkönkulutuksen kasvu

Lämpöpumppujärjestelmään siirtyessä kiinteistön sähkönkulutus kasvaa merkittävästi, joka voi johtaa sulakekoon kasvattamiseen, joka tulee huomioida investointihinnassa. Kiinteistön sähkönkulutuksen kasvu arvioidaan opinnäytetyössä suuntaa antavasti. Ennen lopullista päätöstä lämpöpumppujärjestelmään hankinnasta tulee sähköjärjestelmän riittävyys arvioida asian osaavan asiantuntijan toimesta.

Opinnäytetyössä kiinteistön sähkönkulutuksen huippukuorman arvioitiin toteutuneiden kulutusten perusteella käyttäen vain tuntikulutustietoa. Tuntikulutus ei kuitenkaan riittävän tarkkaa kuvaa taloyhtiön sähköliittymän huippukuormista, sillä suurimman todellisen hetkellisen sähkönkulutuksen määrittämiseksi tarvittaisiin esimerkiksi lista kaikista taloyhtiön sähköliittymään liitetyistä laitteista ja niiden tehoista.

Kiinteistön sähkönkulutuksen huippukuorma arviointi perustui toteutuneiden kulutusten ja oletettujen laitteiden huipputehon tarpeisiin. Suurimman hetkellisen huipputehon sähkönkulutuksen aiheuttaa taloyhtiön hissi. Hissin hetkelliseksi kuormaksi arvioitiin 12 kW, joka vastaa tyyppillistä hisseissä käytettävien moottorien tehoa. Poistoilmalämpöpumppujen sähkönkulutus mitoitusulkolämpötilassa 28 kW. Sähkönkulutuksen huipputuntiteho ennen poistoilmajärjestelmää oli 25 kW.

Maalämpöjärjestelmän suunnitelluksi tehoksi on arvoitu 70 kW, joka tarkoittaa realistisella hyötysuhteella (COP 2,5) mitoitusulkolämpötilassa 28 kW.

Huipputehoksi saadaan näillä tiedoilla 93 kW. Sähkötehon vaatima virta voidaan laskea kaavalla 14.

$$I = \frac{P}{U} \quad (14)$$

missä I virta, A

U jännite, V

P huipputeho, kW

Kaavalla 14 laskettuna virraksi saadaan 387,5 A. Mikäli kuorma voidaan jakaa tasaisesti kaikille kolmelle vaiheelle, saadaan vaihe virraksi 129 A. Suolakekoon voidaan olettaa jäävän pieneksi, joten sulakokoon kasvattaminen tulee ottaa huomioon kannattavuuslaskelmissa.

7.2 Muut energiatehokkuuden kehittämistoimenpiteet

7.2.1 Käyttöveden kiertojohtoon lämmityslaiteet

Käyttöveden kiertojohtoon liitetyt lämmityspatterit tarvitsevat vuodenajasta riippumatta jatkuvan 7 kW lämmitystehon. Lämmityspatterit kuluttavat vuositasolla energiaa 61 320 kWh. Suuri osa energiasta hyödynnetään kiinteistön lämmitykseen varsinkin lämmityskaudella. Kuitenkin kesäaikana lämmityspatterit tuovat ylimääräistä lämpökuormaa asuntoihin, mikä nostaa asuntojen lämpötilaa.

7.2.2 Patteriverkoston asetusarvon nostaminen

Poistoilmalämpöpumppujen lämpötilaksi lämmityskäyttöön oli asetettu maksimiksi +50 °C. Poistoilmalämpöpumppujen säätökäyrän mukaan varaajan lämpötila +50 °C vastaa -7 °C ulkolämpötilassa patteriverkostoon menevän veden lämpötilaa. Tästä syystä kaukolämmöllä tuotetun energian osuus kasvaa lämpötilan laskiessa alle -7 °C.

Lämmityskäyttöön tuotettavaa maksimi lämpötilaa nostettiin tammikuussa 2019, jotta poistoilmalämpöpumput tuottaisivat isomman osuuden rakennuksen lämmitykseen käytettävästä energiasta kovemmilla pakkasilla.

7.3 Investointihinta

Energiakaivojen laskettu tehollinen syvyys on 1388 m, jolloin tarvitaan 6 kpl 250 metriä syviä energia kaivoja. Energiakaivojen investointikustannuksen laskennassa käytetään energiakaivolle hintana 33 €/m. Energiakaivojen hinnaksi tulee 49 500 €.

Valittujen maalämpöpumppujen hinta on 52 650 €.

Käyttövesivaraaja kapasiteetin kasvattamiseksi 2,5m³ tarvitaan yksi 1,5 m³ varaaja lisää, jonka hinta on 2000 €

Lämpöpumppujärjestelmään tarvittavien lisätarvikkeiden hinnaksi arvioitiin 5000 €.

Tämän lisäksi sulakoon kasvattaminen nostaa investointihintaa. Opinnäytetyössä ei laskettu todellista sähköliittymän muutostöihin tarvittavaa investointikustannusta vaan oletettiin muutostyön hinnaksi 20 000 €.

Järjestelmän investointihinnaksi muodostui 129 150 €. Järjestelmän investointihinnassa ei huomioitu asennustyön osuutta.

7.4 Laskennassa käytetyt energianhinnat

Kiinteistön kaukolämmön hinta koostuu kaukolämmön kulutuksesta maksettavasta energianmaksusta ja kaukolämmön perusmaksusta.

Kaukolämmön perusmaksu perustuu kaukolämmön kulutustietojen perusteella määritettyyn laskutustehoon. Laskutustehona käytetään kaukolämmön tuntikulutustietojen kolmen tunnin liukuvan keskiarvon suurinta arvoa.

Kaukolämmön perusmaksu lasketaan kaavalla 15.

$$\text{Perusmaksu} = K * (96 * 33 * P) \quad (15)$$

missä K kerroin 1,1

P laskutusteho, kW

Kaukolämmön energia on kausihinnoiteltu, joka tarkoittaa, että kulutetun energian yksikköhinta vaihtelee ajankohdan mukaan. Taulukossa 2 on esitetty kuinka, kaukolämmön yksikkö hinta vaihtelee eri kuukausina.

Taulukko 2 Kaukolämmön kausihinnoiteltu energianhinta

Joulu-helmi €/MWh	Maalis-touko €/MWh	Kesä-elo €/MWh	Syys-loka €/MWh
65,2	54,64	37,26	54,65

Kiinteistön sähkösopimuksen yksikkö hinta kulutetulle sähköenergialle on 66,7 €/MWh ja kuukausimaksu 4 €/kk. Sähkön siirtohintaa koostuu energiaverosta, tehomaksusta, energiamaksusta ja perusmaksusta. Tehomaksu maksetaan laskutusjakson korkeimman yksittäisen tuntitehon mukaan. Energiamaksu on hinnoiteltu päivä- ja yöajalle erikseen. Yöajaksi on määritetty 22-07. Taulukossa 3 on esitetty sähkönsiirtomaksu perusteet.

Taulukko 3 Sähkön siirtohinnot

Perusmaksu	13,1 €/kk
Teho	0,81 €/kW,kk
Siirtomaksu päivä	0,0261 €/kWh
Siirtomaksu yö	0,0144 €/kWh

7.5 Takaisinmaksuaika

Maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika laskettiin vertaamalla teoreettisia lämmityskustannuksia eri lämmitysratkaisujen välillä. Laskelmissa poistoilmalämpöpumppujen hyötysuhteeksi oletettiin 2,8 ja maalämpöpumpun hyötysuhteeksi 2,7.

Kaukolämpöjärjestelmän vuotuiset lämmityskustannukset ovat 25 330 €/v. Laskelmat on esitetty liitteessä 4.

Kaukolämmön ja poistoilmalämpöpumppujen vuotuiset lämmityskustannukset ovat 20 869 €/v. Laskelmat on esitetty liitteessä 5.

Maalämpö- ja poistoilmalämpöpumppujärjestelmän vuotuiset lämmityskustannukset ovat 16 935 €/v. kustannuslaskelmat esitetty liitteessä 3.

Maalämpöjärjestelmän vuotuiseksi säästökseen saadaan 3 934 €/v verrattuna kaukolämmön ja poistoilmalämpöpumppujen yhteiskytkentään.

Maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika lasketaan kaavalla 16.

$$T = \frac{I}{N} \quad (16)$$

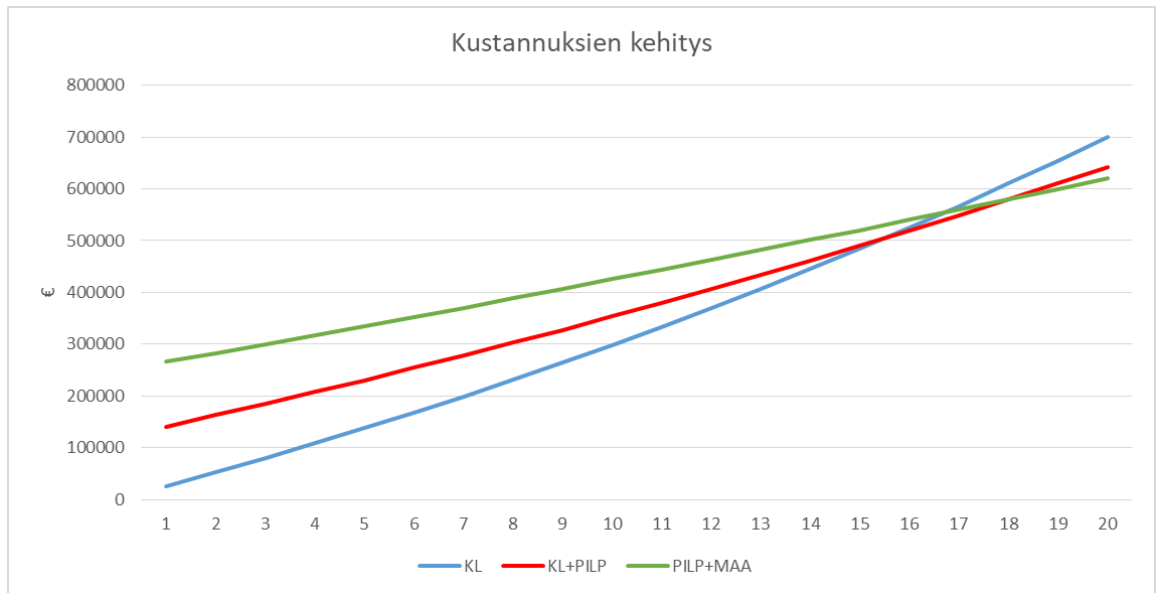
Jossa T Takaisinmaksuaika, v

I Investointihinta, €

N Vuotuinen säästö, €

Kaavalla 16 laskettuna takaisinmaksuajaksi saadaan n. 33 vuotta.

Energianhinnat ovat olleet jatkuvassa kasvussa. Energianhintojen voidaan olettaa siis kasvavan jatkossakin, josta johtuen kannattavuus laskelmissa tulee ottaa huomioon energianhintojen nousu. Energian-hintojen odotetaan kasvavan laskelmissa niin, että kaukolämmön hinta nousee joka vuosi 2 % ja sähkön hinta 1 %. Näillä oletuksilla laskettiin lämmityskustannuksien kehitys eri lämmitysjärjestelmille kahdenkymmen vuoden ajalle. Vertailtavat lämmitysjärjestelmät olivat kaukolämpö (KL), kaukolämmön ja poistoilmalämpöpumppujen yhteiskytkentä (KL+PILP) sekä poistoilmalämpöpumppujen ja maalämpöpumppujen yhteiskytkentä (PILP+MAA). Laskelmat on esitetty kuviossa 21.



Kuvio 21. Lämmityskustannuksien kehitys eri lämmitysjärjestelmillä

Kuviosta 21 voidaan havaita, että kun lämmitysjärjestelmän kustannuksissa huomioidaan energianhintojen kasvu, niin takaisinmaksuaika pienenee huomattavasti. KL+PILP –järjestelmän takaisinmaksuaika voidaan lukea kuviosta siitä kohtaa jossa punainen viiva leikkaa sinisen viivan. PILP+MAA –järjestelmän takaisinmaksuaika voidaan lukea kohdasta jossa vihreä viiva leikkaa punaisen viivan. Näin ollen KL+PILP takaisinmaksu aika 15 vuotta ja PILP+MAA järjestelmän takaisinmaksuaika 18 vuotta.

7.6 Vaikutukset hiilidioksidipäästöihin

Lämmitysratkaisujen hiilidioksidipäästöjä voidaan arvioida sähkön ja kaukolämmön CO₂-päästökertoimien avulla. Päästökertoimien avulla kokonaisenergiankulutuksesta voidaan laskea kaukolämmön ja sähkön kulutuksesta aiheutuvat päästöt.

Sähkön päästökertoimena käytetään Motivan ilmoittamaa sähköntuotannon keskiarvoista päästöä. Sähköntuotannon keskimääräinen ominaispäästökerroin on 164 g/kWh. (CO₂-päästökertoimet. 2018.)

Kaukolämmön ominaispäästönä käytetään Kuopion energian ilmoittamaa ominaispäästöä kaukolämmölle. Kuopion energia on teetättänyt diplomityön kaukolämmön ja sähköntuotannosta. Kaukolämmön ominaispäästöt on laskettu

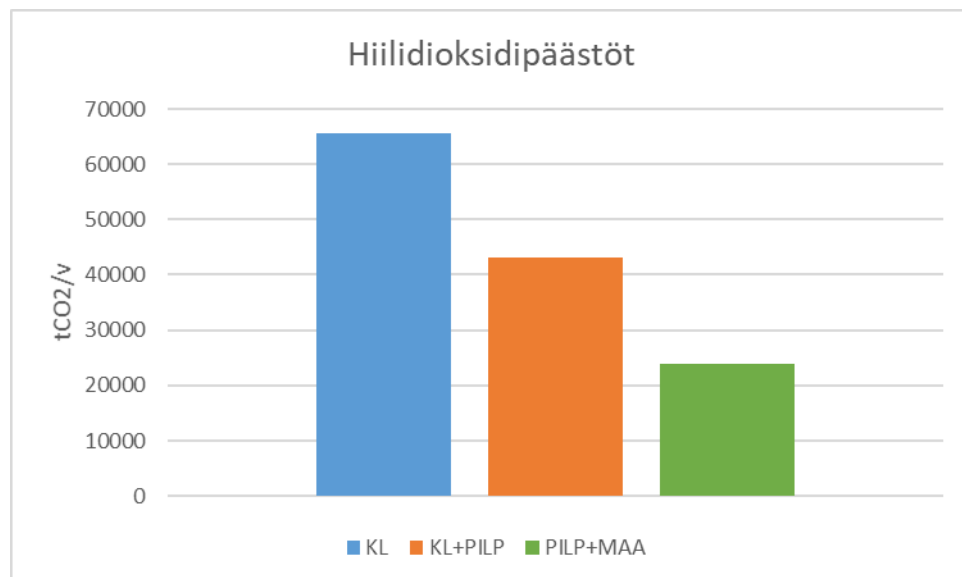
useammalla eri tavalla. Diplomityön tekijä mainitsee GHG-menetelmän olevan hyvä, sillä se ottaa huomioon kaikki päästöt tuotantoketjun kaikissa osissa. GHG-menetelmällä kaukolämmön omaispäästökseen on ilmoitettu 164,8 g/kWh. (Javanainen. 2017, 82)

Hiilidioksidipäästöjä vertailtiin kolmen lämmitysjärjestelmän osalta. Vertailtavat lämmitysjärjestelmät olivat kaukolämpö (KL), kaukolämmön ja poistoilmalämpöpumppujen yhteiskytkentä (KL+PILP) sekä poistoilmalämpöpumppujen ja maalämpöpumppujen yhteiskytkentä (PILP+MAA).

Taulukko 4 Lämmitysjärjestelmien energiankulutus sekä ominaispäästökertoimet

	Kaukolämpö	Ominaispäästökerroin	Sähkö	Ominaispäästökerroin
	kWh	g/kWh	kWh	g/kWh
KL	368198	164,8	30000	164
KL+PILP	145455	164,8	109551	164
PILP+MAA		164,8	163423	164

Taulukossa 4 esitettyjen energiankulutuksen ja ominaispäästökertoimien avulla on laskettu eri lämmitysjärjestelmien ominaispäästöt. Laskennalliset hiilidioksidipäästöt on esitetty kuviossa 22.



Kuvio 22. Laskennalliset hiilidioksidipäästöt

8 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, onko kiinteistön taloudellisesti kannattavaa irtautua kaukolämmöstä maalämpö- ja poistoilmanpumppujen ansiosta sekä tarkastella hankkeen vaikutusta kohteen ympäristöpäästöihin.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset olivat:

Voiko esimerkki kiinteistön lämmityksen hoitaa nykyistä taloudellisemmin maalämpö- ja poistoilmalämmöntalteenotto-järjestelmällä?

Mikä on tarvittavan maalämpöpumpun mitoitusteho ja miten paljon energiakaivoja tarvitaan?

Millainen vaikutus hankkeella on kiinteistön energiankustannuksiin ja ympäristöpäästöihin?

Opinnäytetyössä tuloksina saatiin määritettyä kiinteistön lämmitysenergian ja tehontarpeelle mitoitettu maalämpöjärjestelmä, jonka taloudellinen kannattavuus sekä ympäristöpäästöt arvoitiin. Lisäksi selvitettiin, mitkä ovat kiinteistön energiankulutuksen eri osa-alueet.

8.1 Kannattavuuden arviointi

Hankkeen taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi energian hintojen kehitys. Nykyisillä energian hinnoilla kaukolämmön korvaaminen maalämmöllä ei ole kannattavaa, jos tavoitteena on nopea takaisinmaksuaika. Kaukolämmön hintataso paikallisella kaukolämpöyhtiöllä on kilpailukykyinen, mistä johtuen vastaavalla energiankulutuksella saataisiin toisella paikkakunnalla suurempia säästöjä.

Maalämpöjärjestelmän taloudelliseen kannattavuuteen vaikuttaa merkittävästi myös lämpöpumppujen alhainen hyötysuhde, joka johtuu kiinteistössä käytettävästä korkeasta patteriverkoston menoveden lämpötilasta. Myös lämpimän käyttöveden

kierrosta aiheutuva lämpöhäviö on vuositasolla todella merkittävä, sillä kiertoveden tuottamiseen tarvitaan myös jatkuva korkea lämpötilataso.

Ympäristönäkökulman kannalta kaukolämmön korvaaminen on kannattavaa, sillä kiinteistön lämmityksestä aiheutuvat laskennalliset hiilidioksidipäästöt laskevat merkittävästi.

Opinnäytetyön luotettavuuteen vaikuttavat käytetyt menetelmät, kulustietojen luotettavuus ja opinnäytetyön tekijän tuntemus aiheesta. Energiakaivojen osalta mitoitus tehtiin käyttäen taulukkoarvoja, vaikka suurten kiinteistöjen vaatimien useiden energiakaivojen mitoitus tulee tehdä termisenvastetestin pohjalta, mikä tulee huomioida, mikäli maalämpöjärjestelmä halutaan joskus toteuttaa.

Taloudellisuuden kannattavuuslaskelmissa toteutuvat säästöt kuvaavat tilannetta, jossa laitteet toimivat ideaalisesti, jolloin laskennalliset säästöt kuvaavat suurinta mahdollisinta potentiaalista säästöä tarkasteltavilla tekniikoilla. Todellisessa tilanteessa vuotuiset säästöt voivat jäädä aavistuksen pienemmäksi, koska lämmitysjärjestelmän laskennalliset säästöt on laskettu verrattain kylmälle vuodelle, jolloin säästöä kertyy enemmän, kun energiankulutus on suurempi.

Opinnäytetyö oli varsin laaja johtuen opinnäytetyön tekijän kiinnostuksesta aihetta kohtaan. Opinnäytetyöstä havaittiin kuinka monia asioita tulee ottaa huomioon ja kuinka paljon työtä tarkastelu vaatii.

8.2 Johtopäätökset ja jatkotoimenpiteet

Kaukolämmön ja sähkön hintojen suhteella on suurimerkitys kiinteistön lämmitysjärjestelmän valintaan. Kuitenkin energian hinnat ovat jatkuvassa muutoksessa ja tulevaisuudessa energian hintojen muutokset vaikuttavat merkittävästi eri lämmitysratkaisujen kannattavuuksiin.

Jos maalämpöjärjestelmä toteutetaan heikosta kannattavuudesta huolimatta, on suositeltavaa, että ennen energiakaivojen lopullista mitoitusta kohteessa tehdään koeoperaus ja TRT-mittaus, jonka perusteella saadaan tieto kallioperän lämmön-

johtavuudesta. Kallioperän lämmönjohtavuudella on suuri merkitys energiakaivojen tarvittavaan määrään. Mittauksen perusteella tehdyllä energiakaivojen mitoituksella voidaan tarvittavien energiakaivojen määrä määrittää luotettavammin. Lisäksi tulisi selvittää, onko poistoilmalämpöpumppuja mahdollista hyödyntää kesäaikana energiakaivojen lataukseen. Näillä toimilla voidaan pienentää merkittävästi energiakaivon investointi kustannuksia.

Opinnäytetyössä lämpöpumpun valinnasta teki ongelmallisen suunniteltavan lämmitysjärjestelmän vaatimukset. Maalämpöpumpulla täytyisi tuottaa käyttöveden kierto-johdon lämpöhäviö. Kiertojohdon lämpöhäviö on tasainen, lähes vuodenajasta riippumaton lämpökuorma. Kiertojohdon lämmöntuottamisen lämpöpumpulla tekee ongelmalliseksi kiertojohdon lämpötila. Korkeasta lämpötilasta johtuen lämpöpumpun hyötysuhde on heikko. Kiertojohdon lämpöhäviötä tulisikin pienentää. Kiertojohdosta tulisi poistaa vähintään siihen liitetyt lämmityslaitteet, jotta maalämpöpumppujärjestelmä tulisi kannattavammaksi.

Kiinteistön sähkönkulutus nousee maalämpöpumppujärjestelmällä mitoitus-ulkolämpötilassa niin korkeaksi, että sähköliittymään joudutaan joka tapauksessa tekemään muutoksia. Kannattaisi myös selvittää onko kannattavampi lisätä kiinteistöön hieman sähkökattilatehoa ja mitoittaa maalämpöjärjestelmä alhaisemmalle tehon peitolle.

Yksi tärkeä tekijä järjestelmän kannattavuuteen on myös kiinteistön korkea patteriverkoston lämpötila. Kiinteistön patteriverkoston lämpötilaa laskemalla saataisiin lämpöpumppujen hyötysuhdetta nostettua, jolloin vuotuiset säästöt olisivat suuremmat. Patteriverkoston lämpötilan laskeminen edellyttäisi nykyisien patterien vaihtamista matalan lämpötilan pattereihin. Kuitenkaan pelkästään hyötysuhteen parantamistarkoituksessa ei pattereita kannata vaihtaa. Patterien vaihdolle täytyisi olla myös jokin muu syy, kuten teknillistoloudellisen käyttöiän täyttyminen. Olemassa olevien patterien lämmönluovutuskykyä voitaisiin nostaa lisäämällä esimerkiksi puhallin patterin kylkeen. Kuitenkaan tämänlaista tekniikkaa ei ole vielä saatavilla markkinoilla valmiina ja todistetusti toimivina ratkaisuuina.

Opinnäytetyössä selvisi myös, että kiinteistön poistoilmalämpöpumput käyvät katkonaisesti leudoilla keleillä. Tästä syystä tulisi selvittää voidaanko poistoilmalämpöpumppujen käyntiä ohjata niin, että ulkolämpötilaa vastaava määrä poistoilmalämpöpumppuja on käynnissä kerrallaan, jolloin lämpöpumppujen kompressorit kävisivät tasaisemmin. Tällä ohjausmuutoksella voisi olla vaikutusta lämpöpumppujen hyötysuhteeseen ja käyttöikään.

Lähteet

1010/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Suomen säädöskokoelma. Helsinki: Oikeusministeriö.

A 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Viitattu 17.2.2019

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

A 1047/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen vesi- ja viemärilaitteistosta. Viitattu 18.2.2019. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047>

Boles, M. & Cengel, Y. 2015. Thermodynamics: An Engineering Approach. Eighth Edition. New York: McGraw-Hill Education.

CO₂-päästökertoimet. 2018. Artikkelit Motivan internetsivustolla. Viitattu 10.2.2019.

https://www.motiva.fi/ratkaisut/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energian kulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet

Domestic High Temperature Heat Pumps. 2016. Evidence gathering - Low Carbon Heating Technologies. Lontoo: Department for Business, Energy and Industrial Strategy.

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/565239/Domestic_High_Temperature_HP_s_FINAL2.pdf

Energiatilasto 2017. Tilastokeskuksen energiatilastokokoelma. Viitattu 24.2.2019

https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2017/data/kalvo1_s.pdf

Energiatehokkuus. 2018. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Suomen rakennusmääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. Viitattu 20.2.2019.

<http://www.ym.fi/download/noname/%7B4332AA81-75E1-4CA0-B208-B0ACB60A267F%7D/133692>

Ilmastonmuutos ilmiönä. N.d. Artikkelit ilmasto-oppaan internetsivustolla. Viitattu 19.1.2019. <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio>

Ilmastonmuutoksen hillitseminen. 2018. Artikkelit ympäristöministeriön internetsivustolla. Viitattu 22.1.2019. http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen

Javanainen, M. 2017. Kuopion Energian lämmön- ja sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt. Diplomityö, Oulun yliopisto, ympäristötekniikka. Viitattu 4.1.2019. https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2018/05/diplomityo_marijavanainen.pdf

Julkaisu K1/2013. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Päivitetty 9.5.2014. Helsinki: Energiateollisuus ry. Viitattu 22.2.2019.

Juvonen, J. & Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientalossa. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Kaukolämpöä tuotetaan lähellä asiakasta. N.d. Artikkelit Energiateollisuus ry:n internetsivustolla. Viitattu 14.2.2019. https://energia.fi/perustietoa/energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto

Kaukolämpötilasto 2017. 2018. Energiateollisuus ry:n kaukolämmön tilastoraportti. Viitattu 19.2.2019. https://energia.fi/files/2949/Kaukolampotilasto_2017.pdf

Kerrostalojen maalämpöjärjestelmiin tehokkuutta kaivokentän suunnittelulla. N.d. Artikkelit Gebwellin internetsivustolla. Viitattu 17.2.2019. <https://www.gebwell.fi/kerrostalojen-maalampojarjestelmiin-tehokkuutta-kaivokentan-suunnittelulla/>

Kulutuksen normitus auttaa kulutusseurannassa. 2016. Kulutuksen normitus. Laskentakaavat ja -ohjeet. Motiva. https://www.motiva.fi/files/12186/Kulutuksen_normitus_Laskentakaavat_ja_ohjeet_Motiva_Oy_12-2016.pdf

Laaksonen, E. & Yrjölä, J. 2015. Domestic Hot Water Production with Ground Source Heat Pump in Apartment Buildings. Energies 2015, 8, 8447-8466. Viitattu 2.2.2019. <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/8/8447>

Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. 2019. Artikkelit Motivan internetsivustolla. Viitattu 20.1.2019. [https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian_kaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian kaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi)

Legionella, ympäristötekijät ja torjuntamahdollisuudet. 2018. Artikkelit Terveystieteiden ja hyvinvoinninlaitoksen internetsivustolla. Viitattu 8.2.2019. <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/ymparistotekijat-ja-torjuntamahdollisuudet>

Lylykangas, K., Valjus, J., Reinikainen, E., Matilainen, P., Pulakka, S., Pulakka P., & Åström, G. 2015. Energiatehokas asuinrakennus – kohti lähes nollaenergiarakentamista. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Lämmitystarveluku. N.d. Artikkelit ilmatieteen laitoksen internetsivustolla. Viitattu 14.1.2019. <https://ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>

Lämpöpumput. 2012. LVI-ohjekortti 11-10332. Rakennustieto Oy. Rakennussäätiö RTS.

Lämpöä kotiin keskitetysti. 2012. Motivan kaukolämpöopas.

https://www.motiva.fi/files/7963/Lampoa_kotiin_keskitetysti_Kaukolampo.pdf

Lämpöä omasta maasta. 2012. Motivan maalämpöpöopas.

https://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf

Maalämpöpumppuopas. N.d. NIBE:n internetsivustolla. Viitattu 14.2.2019

https://www.nibe.fi/Documents/haato_fi/NIBE%20MLP%20JA%20VPDIM%20OPAS%201137-1.PDF

Maalämpöpumput. Pientalot. 2018. LVI-ohjekortti 11-10623. Rakennustieto Oy. Rakennussäätiö RTS.

Maalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. 2018. LVI-ohjekortti 11-10624. Rakennustieto Oy. Rakennussäätiö RTS.

Perälä, R. & Perälä, O. 2013. Lämpöpumput: suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. Helsinki: Alfamer/Karisto cop

RakMK D1. 2007. Ympäristöministeriön asetus kiinteistöjen vesi- ja viemäri-laitteistoista. Viitattu 12.1.2019. <http://www.finlex.fi>, ajantasainen lainsäädäntö.

Rantala, E. 2014. Uusiutuvien lähienergioiden käyttö rakennuksissa. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto.

Sisäilman kosteus. N.d. Artikkelit Hengitysliiton internetsivustolla. Viitattu 12.2.2019 <https://www.hengitysliitto.fi/fi/sisailma/sisailma-asiat-sisailmaongelmat/sisailman-kosteus-ja-lampotila>

Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2016. 2017. Raportti Tilastokeskuksen internet sivustolla. Viitattu 22.1.2019. https://tilastokeskus.fi/til/khki/2016/khki_2016_2017-05-24_kat_001_fi.html

Talotekniikan palvelut saman katon alta. N.d. Artikkelit Suomen Talotekniikan internetsivustolla. Viitattu 12.3.2019. <http://suomentalotekniikka.fi/konserni/>

TRT-mittaus. N.d. Artikkelit Rototec Oy:n internetsivustolla. Viitattu 1.2.2018 <https://www.geodrill.fi/trt-mittaus/>

Uusiutuvan energian käyttö ennätystasolla vuonna 2016. 2017. Raportti Tilastokeskuksen internetsivustolla. Viitattu 20.1.2018. https://www.stat.fi/til/ehk/2016/ehk_2016_2017-12-08_tie_001_fi.html

Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. 2017. Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö.

Valtioneuvoston selonteko keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelmasta vuoteen 2030. 2017. Kohti ilmastoviisasta arkea. Ympäristöministeriö.

Vedenkulutus taloyhtiössä. 2018. Artikkele Motivan internetsivustolla. Viitattu 18.1.2019.

https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tietoa_ energian- ja_ vedenkulutuksesta/vedenkulutus_ taloyhtiossa

Virta, J. & Pylsy, P. 2011. Taloyhtiön energiakirja. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus.

Liitteet

Liite 1. Vanhan asuintalon lämmönjakokeskuksen mitoitus (Julkaisu K1/2013, 74)

74

15.4 Vanhan asuintalon lämmönjakokeskuksen mitoitus

Lämmityshuipputeho voidaan arvioida tietyn ajanjakson lämpöenergian tai polttoaineen kulutuksen perusteella. Laskenta voidaan tehdä seuraavan yhtälön mukaisesti niissä asuinrakennuksissa, joissa ei ole koneellista ilmastointia (tuloilman lämmitystä).

$$\Phi_{mt} = \frac{Q_l}{H} = \frac{Q - Q_k}{24 \times S} = \frac{(Q - Q_k) \times (17^\circ\text{C} - t_u)}{24 \times S \times (17^\circ\text{C} - t_u)}$$

- Φ_{mt} = Lämmityksen huipputehontarve (mitoitusteho), kW
 H = $24 \cdot S / (17^\circ\text{C} - t_u)$ = Lämmityshuipun käyttöaika tarkasteluaikana, h
 S = Lämmitystarveluku tarkasteluaikana, °Cd
 t_u = Paikkakunnan mitoitusulkolämpötila, °C
 Q = Energiankulutus tarkasteluaikana, MWh
 Q_{kv} = Käyttöveden lämmittämiseen kulunut lämmitysenergia tarkasteluaikana (kiinteä kulutus), MWh
 Q_l = $Q - Q_{kv}$ = Lämmitykseen kulunut energia tarkasteluaikana, MWh

Jos tunnetaan rakennuksen polttoaineen kulutus, muutetaan tarkastelujakson polttoaineen kulutus lämpöenergiaksi kertomalla polttoaineen ominaislämpöarvo polttoainemäärällä ja lämmityslaitteen arvioidulla hyötysuhteella (vuosihyötysuhde esim. 0,7) ja lasketaan lämmityshuipputeho em. mukaisesti.

Laskelmat tarkistetaan arvioimalla näin saatua ominaistehoa ja –kulutusta vertaamalla niitä vastaaviin muihin rakennuksiin.

Laskentamenetelmä ei sellaisenaan sovellu käytettäväksi koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustettujen rakennusten lämmityshuipputehon laskentaan. Näissä tapauksissa on ilmanvaihtolaitteiden tehot ja käyntiajat selvitettävä ja laskettava lämmityshuipputeho tätä kautta saatavien lisätietojen perusteella.

ESIMERKKI 5.

Lähtötiedot:

• Asuinrakennus, rakennustilavuus		10850 m ³
• Valmistumisvuosi		1974
• Sisälämpötila	t_s	21 °C
• Mitoitusulkolämpötila	t_u	-29 °C
• Asuntoja		52 kpl
• Käyttövesipiiriin liitettyjen lämmityslaitteiden teho	$\Phi_{kv,pat}$	10 kW
• Energiankulutus (normeerattu)	Q	620 MWh/a
• Kesäkuukausien lämmönkulutus keskimäärin	$Q_{kesä}$	15,3 MWh/kk
• Normaali vuoden lämmitystarveluku	S	4550 °Cd
• Lämmönmyyjän ilm. käytettävissä oleva paine-ero	Δp_{ilm}	200 kPa.

Käyttöveden lämmityksen energiankulutus voidaan arvioida kesäkuukausien kulu- tusten perusteella vähentämällä kulutuksesta ympäri vuoden toimivien käyttö- vesipatterien luovuttama energiamäärä. Käyttövesipatterien luovuttama lämpö

$$Q_{kv,pat} = 10 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h/vuosi} = 87,6 \text{ MWh/vuosi} = 7,3 \text{ MWh/kk}$$

Käyttöveden lämmitykseen on siten kesäkuukausina käytetty keskimäärin

$$Q_{kv} = 15,3 \text{ MWh/kk} - 7,3 \text{ MWh/kk} = 8,0 \text{ MWh/kk}$$

Käyttöveden lämmityksen energiankulutus on siis

$$Q_{kv} = 12 \text{ kk/a} \cdot 8,0 \text{ MWh/kk} = 96,0 \text{ MWh/a}$$

Tarkistetaan vielä rakennuksen lämpöindeksi

$$\frac{620 \text{ MWh/a}}{10850 \text{ m}^3} = 57,1 \text{ kWh/m}^3, \text{a}$$

1. Lasketaan lämmityssiirtimen teho Φ_{ls}

Lämmityksen huipunkäyttöaika

$$H = \frac{24 \text{ h/d} \cdot 4550 \text{ °Cd}}{17 \text{ °C} - (-29 \text{ °C})} = 2374 \text{ h}$$

Lämmityssiirtimellä tuotetaan energiaa

$$Q_{ls} = 620 \text{ MWh} - 96 \text{ MWh} - 87,6 \text{ MWh} = 436,4 \text{ MWh}$$

Lämmityssiirtimen teho on

$$\Phi_{ls} = \frac{436,4 \text{ MWh}}{2374 \text{ h}} = 184 \text{ kW}$$

Tarkistetaan ominaistehon suuruusluokka

$$\frac{184 \text{ kW}}{10850 \text{ m}^3} = 16,9 \text{ W/m}^3 \text{ OK!}$$

2. Lasketaan käyttövesisiirtimen teho Φ_{kv}

Lämpimän käyttöveden normivirtaama $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$, as. Rakennuksessa on 52 asuntoa, normivirtaamien summa on siis $26 \text{ dm}^3/\text{s}$. D1:n mukainen lämpimän käyttöveden mitoitusvirtaama on tällöin $1,45 \text{ dm}^3/\text{s}$.

Käyttöveden lämmityssiirtimen mitoituslämpötilat ovat $70\text{-}20/10\text{-}58 \text{ °C}$.

$$\Phi = \dot{V} \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta T$$

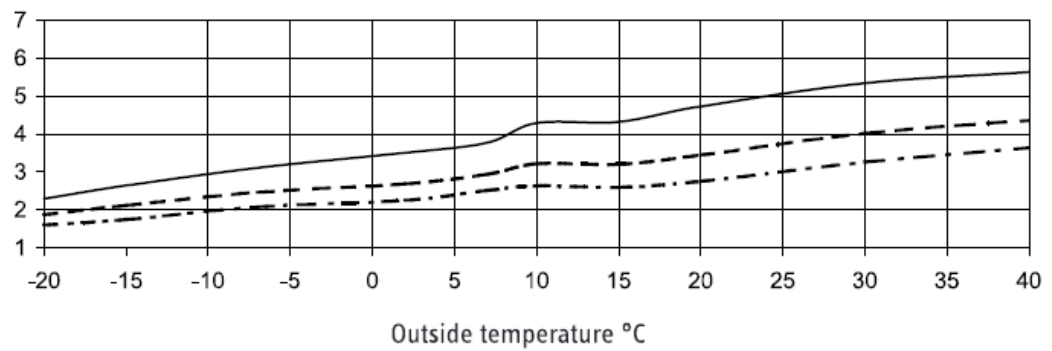
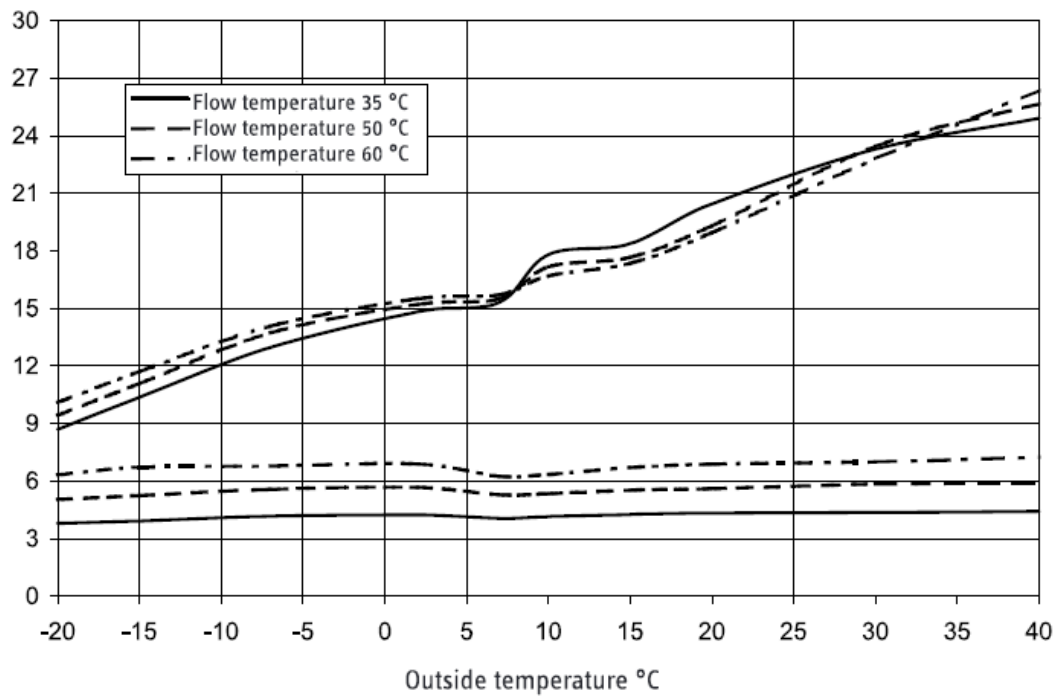
$$\Phi_{kv} = 1,45 \text{ dm}^3/\text{s} \cdot 4,177 \text{ kJ/kg °C} \cdot 0,994 \text{ kg/dm}^3 \cdot (58 \text{ °C} - 10 \text{ °C}) = 289 \text{ kW}$$

3. Käyttöveden säätöventtiilin valinta

Käyttöveden säätöventtiili mitoitetaan ensiöpuolen virtaamalla $V_{kv,e}$

$$\dot{V}_{kv,e} = \frac{\Phi}{\Delta T \cdot c_p \cdot \rho}$$

Liite 2. Poistoilmalämpöpumpujen lämmityskaaviot



Liite 6. Mollier-diagrammi

LIITE 5. Kostean ilman Mollier-piirros 101,3 kPa

