

Laura Inkeroinen

POISTOILMALÄMPÖPUMPUN TEHOKKUUS ASUINKERROSTALOSSA

Opinnäytetyö

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä	Laura Inkeroinen
Työn nimi	Poistoilmalämpöpumpun tehokkuus asuinkerrostalossa
Toimeksiantaja	Suomen Talotekniikka Mikkeli Oy
Vuosi	2021
Sivut	35 sivua, liitteitä 4 sivua
Työn ohjaaja(t)	Tero Lahikainen

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyön tavoitteena oli mitata asuinkerrostaloon kaukolämmön rinnalle asennettujen kahden poistoilmalämpöpumpun keruupiirin virtaamat ja lämpötilat sekä laskea lämpöpumppujen teho mittaustulosten perusteella. Mittattuja arvoja verrattiin suunnitteluarvoihin ja etsittiin mahdollisille poikkeamille syitä. Myös lämpöpumppujen käyttämää sähkötehoa ja poistoilmakanavan kosteutta ennen LTO-patteria mitattiin. Mittaustiedoilla laskettiin suuntaa antavasti lämpöpumppujen lämpökerroin ja arvioitiin kosteuden vaikutusta tehokkuuteen. Lopuksi verrattiin keskimääräistä, kuukausitason normeerattua kaukolämmön ja sähkön kulutusta noin viiden vuoden ajalta ennen ja jälkeen poistoilmalämpöpumppujen asentamisen. Ajanjakso, jolta kulutustiedot laskettiin, oli syyskuu.

Taustaselvityksessä kartoitettiin yhteiskunnan asettamien energiatehokkuustavoitteiden mukaisia vaatimuksia energiankulutukselle asuinrakennuksissa sekä uusiutuvien energianlähteiden osuutta energiatehokkuustavoitteiden saavuttamisessa. Tässä osuudessa tutustuttiin myös lämpöpumppuihin ja erityisesti poistoilmalämpöpumppuun asuinkerrostalossa.

Kohteena oli nelikerroksinen asuinkerrostalo Etelä-Savossa, johon toimeksiantaja oli asentanut kaksi poistoilmalämpöpumppua lämmöntalteenottojärjestelmäksi vuonna 2015. Kohteessa oli lämmönlähteenä kaukolämpö, ilmanvaihtojärjestelmänä koneellinen poistoilmanvaihto ja lämmönjako oli toteutettu vesikiertoisella patterilämmityksellä.

Mittaustulokset osoittivat, että poistoilmalämpöpumput toimivat normaalisti keruupiirien osalta. Tutkimus osoitti myös, että kaukolämmön energiankulutus oli alentunut poistoilmalämpöpumppujen asentamisen jälkeen noin 45 %. Koska lämpöpumppujen asentamisen yhteydessä kohteeseen tehtiin myös ikkunoiden vaihto ja linjasaneeraus, ei kulutuksen alenemista voitu kokonaan laittaa lämpöpumppujen ansioksi.

Asiasanat: lämmön talteenotto, energiatehokkuus, lämpöpumput

Degree	Bachelor of Engineering
Author	Laura Inkeroinen
Thesis title	Efficiency of an exhaust air heat pump in a residential apartment building
Commissioned by	Suomen Talotekniikka Oy
Time	2021
Pages	35 pages, 4 pages of appendices
Supervisor	Tero Lahikainen

ABSTRACT

The objective of this thesis was to measure the flow rates and temperature of the collector circuits of two exhaust air heat pumps in a residential apartment building and to calculate the power of the heat pumps based on the measurement results. The exhaust air heat pumps were installed alongside district heating. The measured values were compared with the design values and the reasons for possible deviations were sought. The electrical power used by the heat pumps and the humidity of the exhaust air duct before the LTO coil were also measured. The heat coefficient of the heat pumps was calculated from the measurement data and the effect of humidity on the efficiency was evaluated. Finally, the average, monthly normalized consumption of district heating and electricity over about a year before and after the installation of the air source heat pumps was compared. The period from which the consumption data was calculated was September.

The background study mapped measures for energy consumption in residential buildings in line with state's energy efficiency goals and the role of renewable energy sources in setting energy efficiency appropriately. In this section, heat pumps and especially the exhaust air heat pump in a residential apartment building were also introduced.

The target building was a four-floor residential apartment building in Southern Savonia. Two exhaust air heat pumps were installed there as a heat recovery system in 2015. The heat source was district heating and mechanical exhaust ventilation was the ventilation system and heat distribution was implemented with water circulation radiators.

The measurement results showed that the exhaust air heat pumps were operating normally for the collection circuits. The research also showed that the energy consumption of district heating was reduced by about 45 % after the installation of off-air heat pumps. At the same time of installation of the heat pumps the windows were also replaced and plumbing renovated therefore the reduction in energy consumption was not only due to the installation of the heat pumps.

Keywords: heat recovery, energy efficiency, heat pumps

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TAUSTASELVITYS	6
2.1	Energiatehokkuustavoite ja uusiutuvat energianlähteet.....	6
2.2	Lämpöpumput.....	7
2.2.1	Ilmalämpöpumput	8
2.2.2	Ilma/vesilämpöpumput.....	9
2.2.3	Poistoilmalämpöpumput.....	9
2.2.4	Maalämpöpumput	10
2.3	Poistoilmalämpöpumppu kaukolämmön rinnalla hybridijärjestelmässä	11
2.4	Tutkimusmenetelmät	12
3	TULOKSET.....	12
3.1	Tutkittavan kohteen perustiedot.....	12
3.2	Mittaukset	14
3.2.1	Mittausjärjestelyt	14
3.2.2	Mittaustulokset.....	16
3.3	Tehon ja energian laskeminen.....	21
3.3.1	Suunnitteluarvojen mukaan laskettu teho	21
3.3.2	Mittaustulosten perusteella laskettu teho	23
3.3.3	Energia käyntiajoilla painotettuna ja kulutuksen normeeraus	24
3.4	Poistoilmalämpöpumppujen lämpökerroin ja sähkönkulutus	26
4	TULOSTEN ANALYSOINTI	27
5	POHDINTA	29
	LÄHTEET.....	31
	LIITTEET	32

1 JOHDANTO

Yhtenä Suomen kansallisena energia- ja ilmastostrategian tavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä. Tämä pohjautuu Euroopan Unionin tekemiin sitoumuksiin, joista uusimpana on Eurooppa-neuvoston 28.6.2021 hyväksymä kanta eurooppalaiseen ilmastolakiin /1/. Eurooppalaiseen ilmastolakiin sisällytetään muun muassa sitova tavoite kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämiseksi 55 %:lla vuoteen 2030 mennessä ja hiilineutraaliuteen pääseminen vuoteen 2050 mennessä. Suomen kansallinen energia- ja ilmastostrategia pohjautuen tähän ilmastolakiin on vireillä ja tavoitteet ovat kovemmat: Suomen hallitus on kirjannut hallitusohjelmaansa vuonna 2019, että Suomi olisi hiilineutraali jo vuoteen 2035 mennessä /2/.

Lämpöpumput ovat yksi uusiutuvia energianlähteitä käyttävistä teknisistä laitteista. Näin lämpöpumppujen käyttöönotto suosii energia- ja ilmastotavoitteisiin pääsemistä. Kun poistoilman lämpö hyödynnetään rakennuksen käyttöveden esilämmitykseen ja lämmitysverkoston lämmitykseen, voidaan saavuttaa jopa 40 %:n säästöt lämmityskuluissa /3/.

Tässä opinnäytetyössä otettiin selvää, miten paljon kaksi poistoilmalämpöpumppua saavat otettua lämpötehoa poistoilmasta ja miten niiden asennus on vaikuttanut kokonaisenergiankulutukseen ja ostosähkön määrään kohteena olevassa kerrostalossa. Tavoitteeseen pääsemiseksi toteutettiin neljän päivän pituinen seurantamittaus, jossa mitattiin liuospiirin virtaamat ja lämpötilat sekä poistoilmakanavan kosteusprosentti. Myös liuospitoisuus mitattiin. Hetkittäisiä mittaustuloksia saatiin myös kompressorien käyttämästä sähkötehosta suuntaa antavan lämpökertoimen suuruutta laskettaessa. Kaukolämmön energiankulutuslukemille suoritettiin normeeraus ennen ja jälkeen poistoilmalämpöpumppujen asennuksen ja kulutustietoja verrattiin saatuihin mittaustuloksiin.

Sähkötehomittarin asennuksessa tarvittiin sähköpätevyudet omaava henkilö. Kiitos Jani Herttuainen avusta sähkötehomittarin asennuksessa ja purkamisessa.

2 TAUSTASELVITYS

Tässä opinnäytetyön viitekehyksessä lähdetään ensin etsimään syitä lämpöpumppujen suosiolle energiapoliittisista tavoitteista. Sen jälkeen käydään läpi uusiutuvien energianlähteiden tämänhetkinen tilanne Suomessa. Lämpöpumppujen eri tyypit käydään läpi ja lopuksi kiinnitetään huomiota etenkin poistoilmalämpöpumppeihin asuinkerrostaloissa.

2.1 Energiatehokkuustavoite ja uusiutuvat energianlähteet

Energiatehokkuus on tällä hetkellä pinnalla oleva asia, koska uusiutumattomien energialähteiden varannot ovat rajalliset ja energiaa kuluu koko ajan enemmän. Siksi on kehitettävä uusia energiamuotoja, jotta maailmassa riittäisi energiaa tulevaisuudessakin. Ilmastonmuutos aiheuttaa omat haasteensa.

Euroopan Unionin neuvosto hyväksyi kantansa eurooppalaiseen ilmastolakiin kesäkuussa 2021. Lainsäädäntöön sisällytetään ”tavoite ilmastoneutraalista EU:sta vuoteen 2050 mennessä” /1/. Tämä vaihe oli viimeinen vaihe hyväksymismenettelyssä ennen ensimmäisen eurooppalaisen ilmastolain säätämistä. Eurooppalaisessa ilmastolaissa tähdätään ilmastoneutraaliuteen vuoteen 2050 mennessä. Myös kasvihuonekaasujen päästöjä vähennetään vuoteen 2030 mennessä 55 % vuoden 1990 tasoon verrattuna. Laissa ei määritellä sen enempää menetelmiä tavoitteeseen pääsemisessä. Hyväksymismenettelyn alkuvaiheessa todettiin kuitenkin, että jäsenmaille on luotava sellainen kehys, joka sisältää välineet, kannustimet, tuen ja investoinnit ilmastotavoitteisiin pääsemiseksi. Näin varmistetaan taloudellisesti hyvä ja oikeudenmukainen sekä tasapainoinen siirtymä, joka ottaa kansalliset näkökohdat huomioon. /1/.

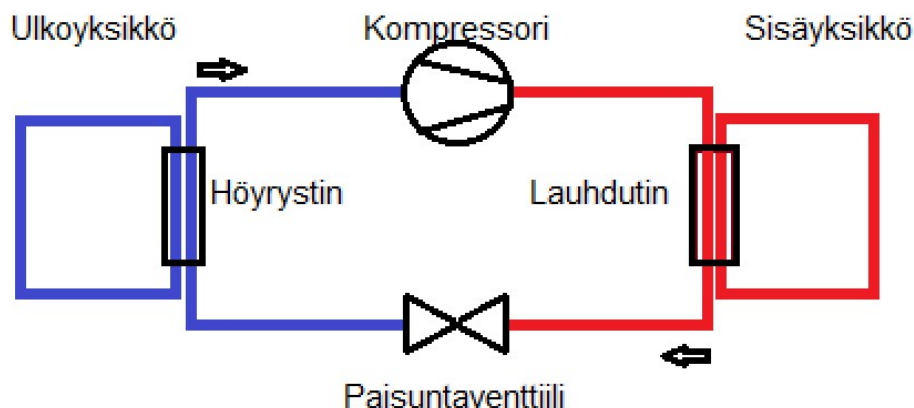
Suomessa ollaan jo melko pitkällä energiatehokkuusvaatimuksen asettamien ehtojen täyttämisessä. Ilmatoon liittyviä päätöksiä on tehty verotukseen liittyen, erilaisiin tuki- ja avustusjärjestelmiin liittyen sekä kävelyn ja pyöräilyn edistämiseen liittyen. Energiaverouudistukseen liittyvät toimenpiteet koskevat esimerkiksi fossiilisten polttoaineiden veronkorotusta. /2, s. 16–19/. Vuonna 2020 uusiutuvat energianlähteet ohittivat jo kokonaiskulutuksessa fossiilisen energian määrän /3/.

Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2020 uusiutuvan energian käyttö oli 40 % ja fossiilisten polttoaineiden 37 %. Aurinkovoiman osuus on kasvanut nopeimmin monen vuoden ajan, vaikka osuus kokonaiskulutuksesta on vielä pieni. Turpeen käyttö väheni eniten, 25 %. Puupolttoaineiden käyttö laski, mikä johtuu säästä ja metsäteollisuuden tuotannon supistumisesta. Lämpövoimalaitoksissa kuitenkin käytettiin haketta saman verran kuin edellisenä vuonna. Sähkön kokonaiskulutus laski 6 % ja oli vuonna 2020 81 TWh. Syynä olivat esimerkiksi sää ja teollisuuden matalampi sähkönkulutus. Tuulivoimalainvestointeja on lähivuosina ennätysmäärä, joista on tulossa noin 1000 MW:n verran uutta tuulivoimaa. Aurinkosähköinvestointeja on rahoitettu vuosien 2017-2020 aikana 51 MWp:n (megawatti peak) verran ja investointien arvo on ollut 52 miljoonaa euroa. /3/.

2.2 Lämpöpumput

Lämpöpumput ovat laitteita, joissa sähköä avuksi käyttäen saadaan ilmasta, maasta tai vedestä tuotettua moninkertainen määrä energiaa verrattuna siihen, mitä lämpöpumppu itsessään tarvitsee sähköä. Koska lämpöpumput käyttävät uusiutuvia energialähteitä ja pystyvät näin auttamaan energiatalouksissa sekä tuovat myös taloudellista hyötyä käyttäjille, on lämpöpumppujen kysyntä nopeasti kasvanut.

Ilmalämpöpumput ja ilma/vesilämpöpumput sisältävät ulko- ja sisäyksikön. Yksikköjen välillä kiertää suljettu kylmäainepiiri ja kylmäaineen lämpötilavaihteluiden ja olomuutosten avulla ulkoyksikön höyrystin kerää lämpöä ilmasta, vedestä tai maaperästä kompressorin kautta sisäyksikön lauhduttimeen. Lauhduttimessa kylmäaine luovuttaa kerätyn lämmön rakennukseen. Kylmäaine jatkaa matkaansa paisuntaventtiilin kautta uudelleen höyrystimeen. Kuva 1.



Kuva 1. Lämpöpumpun toimintakaavio.

Lämpöpumput ryhmitellään neljään eri tyyppiin:

1. Ilmalämpöpumput
2. Ilma-vesilämpöpumput
3. Poistoilmalämpöpumput
4. Maalämpöpumput

Tapa, jolla lämpöä kerätään ja luovutetaan, vaihtelee eri lämpöpumpputyypeissä. /4. s. 53/.

2.2.1 Ilmalämpöpumput

Ilmalämpöpumput ovat kaikkein yleisin lämpöpumpputyyppi. Suomen oloissa ilmalämpöpumppu ei kuitenkaan sovi ainoaksi lämmönlähteeksi. Leudolla säällä, jolloin lämmitystehontarve on vähäinen, ilmalämpöpumppu tuottaisi paljon lämpöä, kun taas pakkasella ilmalämpöpumpusta saa lämpöä vähemmän. Nämä pumpputypit kuitenkin ovat hyviä lisälämmönlähteitä. Myös jäähdytys onnistuu kesäaikaan ilmalämpöpumpun avulla. /4, s. 49/.

Ilmalämpöpumpun lämpökerroin on parhaimmillaan nollakelillä ja pikkupakka-silla. -30 asteen lämpötilassa on turvaututtava jo päälämmönlähteeseen, koska silloin ilma ei enää anna lämpötehoa enemmän, mitä pumppu ottaa sähkötehoa. Ilmalämpöpumppua valittaessa on tärkeää, että se soveltuu Suomen oloihin. Nordic-tyyppiset mallit sisältävät automaattisen sulatustoiminnon,

joka ryhtyy sulattamaan ilmalämpöpumpun yksiköihin kertynyttä kondenssivettä johtuvaa jäätä. Kondenssivesi sisäyksikössä johdetaan yleensä joko viemäriin tai ulkoyksikön kautta maahan. /4, s. 53–54/.

2.2.2 Ilma/vesilämpöpumput

Ilma/vesilämpöpumppu eroaa ilmalämpöpumpusta luovuttamisprosessissa, jossa lämpöpumppu luovuttaa keräämänsä lämmön ilmasta vesivaraajaan. Ilma/vesilämpöpumpun tekniikka, joka sijaitsee ulkoyksikössä, näyttää ulospäin samalta kuin ilmalämpöpumpussakin. Sisäyksikössä on lämminvesivaraaja, joka sisältää sähkövastuksen, jolla varaajan vesi pidetään suunnitelluissa lämpötiloissa kovilla pakkasillakin. Sisäyksikön koko on suurempi ilma/vesilämpöpumpussa kuin ilmalämpöpumpussa. /4, s. 73/.

Ilma/vesilämpöpumppu toimii parhaiten matalissa kiertoveden lämpötiloissa. Näin esimerkiksi lattialämmityksen yhteydessä tämä malli toimii hyvin. Lämpimän käyttöveden suuremman lämmön vaatimus, minimissään +55 °C, toteutetaan ilma/vesilämpöpumpuissa siten, että pumppu aina välillä tuottaa kuumempaa vettä käyttövedeksi ja tämän aikana lämmitys katkeaa. Patteriverkostossa tämä aiheuttaa ylimääräistä meluhaittaa, mutta oikein mitoitetussa järjestelmässä lämmitysverkon puskurivaraaja eliminoi haitan. Maalämpöpumppuun verrattuna ilma/vesilämpöpumpun kerroin jää pienemmäksi pakkasilla. /4, s. 74/.

2.2.3 Poistoilmalämpöpumput

Poistoilmalämpöpumppu kerää lämpöä poistoilmakanavasta ja luovuttaa lämmön joko tuloilmaan tai veteen. Lämmöntalteenottolaitteena poistoilmalämpöpumppu toimii hyvin. Sillä saadaan jopa 40 % pienempi energiankulutus vuodessa. /4, s. 79/.

Poistoilmalämpöpumppu toimii siten, että poistoilmakanavaan asennettu lämmönsiirrin, esimerkiksi lamellipatteri, kerää lämpöä poistoilmakanavasta lämmönsiirtonesteen mukana, siirtää lämmön lämpöpumpun kylmäainekierto, ja

jonka jälkeen lämpö siirtyy lauhduttimen kautta vesivaraajaan. Tämän opin-
näytetyön mittauskohteena olevassa poistoilmalämpöpumppujärjestelmän ve-
sivaraajassa on käyttövesikierukka, joka esilämmittelee käyttöveden. Patteriver-
kostoon asennettu lämmönsiirrin on lämmitysverkostossa rinnakkain kauko-
lämmön lämmönsiirtimen kanssa.

2.2.4 Maalämpöpumput

Maalämpöpumppu on näistä neljästä lämpöpumpputyypistä tehokkain. Sitä
voi käyttää päälämmönlähteenä ja se toimii talvipakkasillakin. Näistä neljästä
lämpöpumppuratkaisusta maalämpöpumppu on kallein. Tämä johtuu esimer-
kiksi lämmönkeruuputkiston asennuksesta. Lämmönkeruuputkisto on asen-
nettu joko vaakatasoon noin metrin syvyyteen lähelle lämmitettävää kohdetta
tai laskettu syvään porakaivoon, lämpökaivoon. Jos kyseessä on rantatontti,
lämmönkeruuputken voi upottaa myös vesistön pohjalle. /4, s. 59/.

Todellisuudessa maalämpöpumpun hyväksikäyttämä lämpö maasta tai ve-
destä on auringon tuottamaa energiaa, jota maaperä tai vesi on varastoinut.
Maalämpöpumppujärjestelmän voi rakentaa myös osatehoisesti: se on edulli-
sempi rakentaa ja pumppu toimii suurimman osan ajasta tehokkaimmalla toi-
minta-alueella hyötysuhteen ollessa parhaimmillaan. /4, s. 60, 62/.

Maalämpöpumpuissa on myös ilma/vesilämpöpumppujen tavoin ratkaistu on-
gelma, joka tulee lattialämmityksen haalean menoveden ja lämpimän käyttö-
veden korkean lämpötilavaateen välillä. Eri valmistajat ovat ratkaisseet tämän
eri tavoilla: joko tulistinpiirillä, vaihtelevalla lauhdutuksella tai käyttövesikieru-
kan käytöllä. Tulistinpiiriratkaisussa käyttövesi esilämmitetään samassa va-
raajassa, mistä lämmitykseen menevä vesikin otetaan. Lopulliseen lämpöti-
laan käyttövesi lämmitetään tulistinpiirissä. Tulistinpiiri on käytännössä läm-
mönvaihdin, joka ottaa lämmön talteen heti kompressorin jälkeen kylmäaineen
ollessa lämpimintä. Vasta tämän jälkeen kylmäaine ohjataan lauhduttimeen,
josta lämpöä otetaan vielä lämmitykseen. Vaihtelevan lauhdutuksen mallissa
käyttöveden lämmitys ja rakennuksen lämmitys vuorottelevat. Korkeampaa
lämpötilaa käytetään käyttöveden lämmityksessä ja matalampaa lämpötilaa

rakennuksen lämmityksessä. Käyttövesikierukan ollessa käyttöveden esilämmityksessä käyttövettä lämmitetään lisää vaadittuun lämpötilaan sähkövastusten avulla. /4, s. 69–70/.

2.3 Poistoilmalämpöpumppu kaukolämmön rinnalla hybridijärjestelmässä

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmät (PILP-järjestelmät) ovat yleistymässä etenkin 1960-1990 luvuilla rakennettujen kerrostalojen saneerausten yhteydessä. Usein nämä kerrostalot on liitetty kaukolämpöön ja niissä on koneellinen poistoilmajärjestelmä. Kun PILP järjestelmä asennetaan, se tuottaa yleensä taloudellista etua taloyhtiölle. Kaukolämpöyhtiön näkökulmasta tilanne on päinvastainen vähentyneen energiankulutuksen takia. /5, 1/.

Poistoilmalämpöpumppu (PILP) voidaan asentaa asuinkerrostaloon rinnakkaislämmönlähteeksi kaukolämmön rinnalle. Kun on koneellinen poistoilmanvaihto ilmanvaihtojärjestelmänä, niin kerrostalon poistoilmassa on suuri hukkalämpö, jos poistoilma puhalletaan ulos ilman lämmöntalteenottoa. PILP-järjestelmän asentamisen jälkeen asuinkerrostalon kaukolämmön kulutus on laskenut keskimäärin 50 %. Poikkeama vaihtelee vajaan 40:n % ja 70:n % välillä. /5, s. 27/.

Lämpöpumppu kytketään yleensä rinnan kaukolämmön kanssa. Energiateollisuuden julkaisussa K1/2020 määritellään rinnakkaislämmön kytkentä sekä tilojen lämmitykseen että käyttöveden lämmitykseen. Tilojen ja käyttöveden lämmityksessä kytkentä ei saa tarpeettomasti heikentää kaukolämpöveden jäähtymää tai taloyhtiön lämmityksen toimintavarmuutta. K1:ssä on kytkentäesimerkkejä sekä tilanteeseen, jossa kaukolämmön laitteet uusitaan samaan aikaan, että tilanteeseen, jossa niitä ei uusita rinnakkaislämmönlähteen asennuksen yhteydessä. /6, s. 92–94/.

Kun PILP-järjestelmän kokonaishyötysuhdetta tarkastellaan järjestelmätasolla, on otettava huomioon, että kaukolämmön energiankulutuksen pienentyessä sähkönkulutus nousee, koska lämpöpumppujen kompressorit käyttävät sähkö-

tehoa verkosta. Se, miten paljon PILP hyödyntää taloyhtiötä riippuu muun muassa lämpöpumpun lämpökertoimesta ja kaukolämmön yhteistuotannon rakennusasteesta. /7, s.27/. Kaukolämmön yhteistuotannon rakennusaste tarkoittaa voimalaitoksen tuottaman sähkön ja lämmön suhdetta.

2.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelmiä on kaksi: kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen. Ensin mainitussa tutkimusmenetelmässä käytetään määrällisiä tapoja tutkia ja toiseksi mainitussa käytetään laadullisia tapoja tutkia. Tässä opinnäytetyössä tehdään mittauksia, jotka kuuluvat kvantitatiivisiin tutkimusmenetelmiin.

Kvalitatiivinen eli laadullinen tiedonhankintatapa käyttää tutkimusmetodeina eli tutkimuksen tekemisen tekniikkana havainnointia, tekstianalyysia, haastattelua ja litterointia. Kvalitatiivisesti lähestytään luonnollisia koeasetelmia vaativia tutkimuskohteita. Myös silloin, kun tulokseksi halutaan saada tietoa syy-seuraussuhteista, joita ei voida kokeen avulla tutkia, käytetään mieluummin kvalitatiivista kuin kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. /8, s. 14./

Kvantitatiivinen tiedonhankintatapa on numeerista, määrällistä. Tällöin tutkimuksen tulokset analysoidaan erilaisilla mittareilla taulukoiksi, tilastoiksi ja muiksi sellaisiksi raporteiksi, joissa käytetään asteikkoja tulosten järjestelmiseksi. Myös kvantitatiivisessa tiedonhankintatavassa voidaan käyttää samoja metodeja kuin kvalitatiivisessa tiedonhankintamenetelmässä, mutta niillä on erilaiset painoarvot eri menetelmissä. /8, s. 15./

3 TULOKSET

Aluksi tässä luvussa on kohteen perustiedot. Sen jälkeen kerrotaan mittausjärjestelyistä ja mittaustuloksista ja lopuksi lasketaan teho, energiankulutus, lämpöpumppujen lämpökerroin ja sähkönkulutus.

3.1 Tutkittavan kohteen perustiedot

Tämän opinnäytetyön kohteena on asuinkäyttöön rakennettu kerrostalo Etelä-Savossa. Rakennuksessa on kolme asuinkerrosta, katolla häkkivarastot sekä

iv-konehuone ja osittain maan pinnan alapuolella yksi kerros yleisiä tiloja sekä teknisiä tiloja. Kerrostalo on rakennettu vuonna 1988 ja siinä on 24 asuinhuoneistoa. Lämmitysmuotona on vesikeskuslämmitys ja ilmanvaihtojärjestelmänä koneellinen poistoilmanvaihtojärjestelmä. Talo on liitetty kaukolämpöön.

Taloon asennettiin kaksi poistoilmalämpöpumppua lämmöntalteenottolaitteiksi vuonna 2015. Pumppujen merkki ja malli on Stiebel Eltron WPF 13 basic. Lämmöntalteenottojärjestelmään sisältyy myös 800 litran varaaja käyttövesikierukalla, merkki Stiebel Eltron SBS 801 W, sekä lämmönsiirrin, liuospumput, lämpöjohtopumppu, lamellipatteri Ekocoil, poistoilmapuhallin, sekoitusventtiili, kytkin ja taajuusmuuttaja. Lämpöpumppu 1 eli normaalikäytön lämpöpumppu käy aina ja lämpöpumppu 2 eli tehostuskäytön lämpöpumppu neljä ja puoli tuntia päivässä. Lämpöpumppu 2 on päällä päivittäin kello 8-9, 11-12, 16-17.30 ja 20-21.

Lämmöntalteenottojärjestelmän lämmönsiirrin asennettiin vesikiertoiseen patteriverkostoon sarjaankytkennällä kaukolämmön lämmönsiirtimen kanssa. Käyttöveden esilämmitykseen asennettiin kierukka varaajaan myös sarjaankytkennällä kaukolämmön lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimen kanssa. Liitteessä 1 on kuvattu toimintakaavio poistoilmalämpöpumppujärjestelmän liittämisestä kaukolämpöön.

Energiateollisuuden julkaisussa ”Rakennusten kaukolämmitys, Määräykset ja ohjeet K1/2020” on rinnankytkentä ainoana esimerkkinä lämmönsiirtimien kytkentätavoista, kun lisälämmönlähde kytketään kaukolämpöön /6, s. 92–94/. Tämän opinnäytetyön mittauskohteena oleva poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä käytetty sarjaankytkentä poikkeaa K1/2020:sta. K1/2020:ssa esitetyssä kytkentäesimerkissä käyttöveden sekä patteriverkoston lämmönsiirtimet on kytketty kaukolämmön lämmönsiirtimen kanssa rinnakkain. Tässä kohteena olevassa kerrostalossa ei ole asennettu erikseen lämpimälle käyttövedelle lämmönsiirrintä, vaan käyttövesi esilämmitetään varaajassa olevassa käyttövesikierukassa ennen kuin vesi jatkaa matkaansa sitä lämmönsiirrintä kohti, jossa kaukolämpö lämmittää veden vaadittuun lämpötilaan. Näin varaajan kierukka toimii lämmönsiirtimenä käyttövedelle.

3.2 Mittaukset

Alun perin mittaukset oli tarkoitus toteuttaa viikon seurantamittauksena. Tavoitteeseen ei päästy, joten mittaukset toteutettiin neljän päivän mittauksena perjantaista maanantaihin. Kohteessa mitattiin liuospiirien virtaamat paineanturilla, liuospiirien meno- ja paluunesteen lämpötilat putken pintaan asennettavalla pinta-anturilla ja poistoilman kosteus kanavasta kosteusanturilla. Antureihin oli kytketty dataloggerit tietoja keräämään. Poistoilmalämpöpumpuista mitattiin myös hetkellisiä sähkötehon mittaustuloksia, joita oli tarkoitus käyttää arvioitaessa suuntaa antavasti lämpökerrointa. Liuospiirin liuoksen jäätymispiste selvitettiin optisella laitteella ja tiheys mitattiin ympäristötekniikan laboratoriossa. Liuospitoisuus arvioitiin sekä optisen laitteen antaman jäätymispisteen että tiheyden arvon avulla DOWCALTM200 -nesteen ominaisuustaulukosta (liite 2).

3.2.1 Mittausjärjestelyt

Poistoilmalämpöpumput sijaitsevat kerrostalon teknisessä tilassa, kellarikerroksessa. Lamellipatteri, joka on asennettu poistoilmakanavaan lämmöntalteenottolaitteeksi, sijaitsee kerrostalon katolla olevassa IV-konehuoneessa.

Liuospiirin meno- ja paluupuolen lämpötilat mitattiin minuutin välein putkien pinnasta käyttäen Grant SQ2010 -sarjan dataloggeria, johon oli yhdistetty T-tyyppin kaapeli, jonka toinen, hitsattu, pää toimi anturina. Kaapelin päähän laitettiin piitahnaa parantamaan mittaustarkkuutta. T-tyyppin termopari eli termoelementti on kaapeli, jossa kaksi sähköisiltä ominaisuuksiltaan samankaltaista materiaalia on hitsattu toisesta päästä yhteen. Lankojen vapaana olevat päät muodostavat vertailupisteen ja kun hitsatun pään ja vertailupisteen välille syntyy lämpötilaero, se näkyy lämpösähkömotorisena voimana, mV-jännitteinä. Jännitteen avulla pystytään laskemaan lämpötila. T-tyyppin kaapelissa on käytetty kuparia ja konstantania eli kuparin ja nikkelin seosta /9/.

Liuospiirin virtaamat mitattiin niin ikään minuutin välein mittayhteistä, jotka sijaitsevat linjasäätöventtiileissä keruupiirin paluupuolella. Mittalaitteina käytettiin TA-SCOPE-mittareita, joihin oli kytketty paineanturiyksikkö. TA-SCOPE-mittareihin asennettiin parametreina venttiilin koko, esisäätöarvo ja liuoksen pitoisuus. Liuospitoisuus saatiin selville optisella laitteella, joka näyttää liuoksen jäätymispisteen. Tätä jäätymispistettä verrattiin kyseisen liuoksen valmistajan sivuilta löytyneeseen taulukkoon (liite 2), jossa oli eri pitoisuuksien jäätymispisteet. /10/.

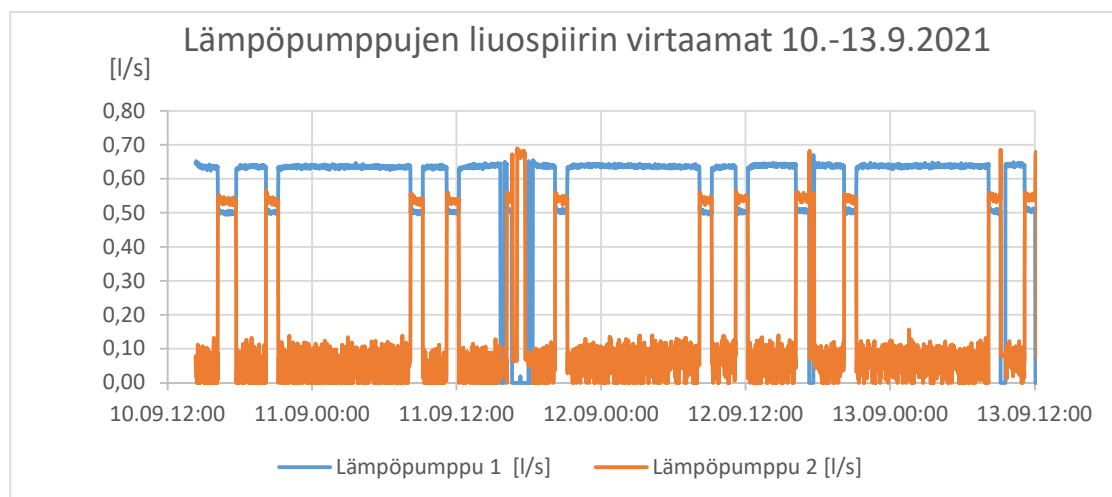
Poistoilmakanavan kosteusmittaus toteutettiin Grant SQ2010 -sarjan dataloggerilla, johon oli yhdistetty kanavan RH-mittaukseen käytettävä anturi. Kosteusanturi sijoitettiin ennen lamellipatteria, joten seurantamittaus näytti kanavan kosteuden ennen LTO-patteria. LTO-patterin jälkeinen mittaus toteutettiin muutamana kertamittauksena TSI Airflow -mittarilla, johon kytkettiin kuuma-lanka-anemometri. Heti mentäessä iv-konehuoneeseen todettiin, että sieltä puuttuu pistorasia, jolloin RH-mittausanturiin, joka tarvitsee virtalähteen toimia-akseen, oli kytkettävä jatkojohto viereisestä huoneesta. Koska iv-konehuoneeseen menevä ovi oli palo-ovi, ei ovea voinut jättää pitkäksi aikaa auki. Näin ol- len kosteusmittaus poistoilmakanavasta toteutettiin lyhyempinä, noin puolesta tunnista kahteen tuntiin päivässä, minuutin välein, mittauksina. Mittauksen ai- kana kohteessa seurattiin mittauksia paikan päällä.

Kompressoreiden ja kiertovesipumppujen sähkötehon mittaus toteutettiin vuo- rotellen lämpöpumpusta 1 ja 2. Sähkötehon mittaus toteutettiin ennen muita mittauksia, joten samanaikaista tietoa muiden mittauksien kanssa ei ole saata- vissa. Kuitenkin sähkötehon mittaustuloksia voidaan käyttää suuntaa antavasti lämpöpumppujen lämpökertoimen määrittelyyn. Sähkötehon mittaus toteutet- tiin Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratoriosta lai- natulla Fluke 433 -sähkönlaatu- ja energiamittarilla. Koska jännite ylittää 24V, tarvittiin sähköpätevyydet omaava henkilö asentamaan sekä purkamaan mit- tari. Sähkötehon lukemia seurattiin päivittäin sekä normaalikäytön että teho- käytön aikana ja kirjattiin manuaalisesti excel-taulukkoon.

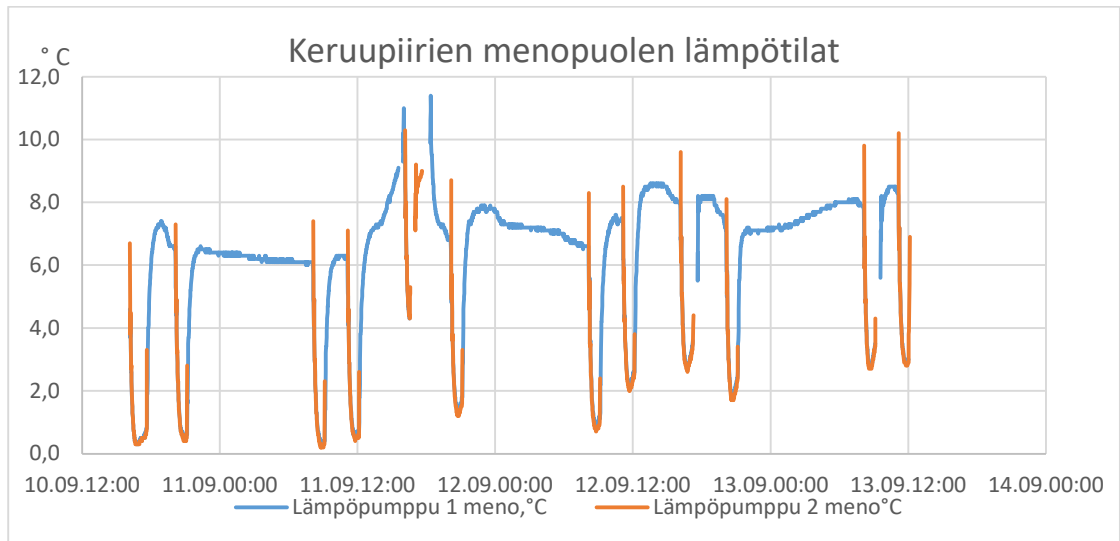
3.2.2 Mittaustulokset

Normaalikäytön lämpöpumppu eli lämpöpumppu 1, joka on päällä aina, oli mittauksen alussa poissa käytöstä korkeapaineanturin maksimiarvon ylittymisen takia. Näin ollen mittaustuloksia saatiin ajalta 10.10.2021 kello 14.19. alkaen 13.10.2021 kello 13.17. asti. Tänä aikana lämpöpumppu 1 oli poissa päältä yhteensä 3 tuntia 13 minuuttia viiteen eri otteeseen. Pisin katkos oli lauantaina iltapäivällä, yhteensä 1 tunti ja 45 minuuttia. Tehostuskäytön lämpöpumppu 2, joka on käynnissä 4,5 tuntia vuorokaudessa lämpöpumpun 1 rinnalla, oli mitausaikana poissa päältä noin 45 minuuttia.

Virtaama lämpöpumpulla 1 normaalikäytössä eli lämpöpumpun toimiessa yksin, oli keskimäärin 0,64 l/s. Tehostustilanteessa lämpöpumpun 1 keskimääräinen virtaama oli pienempi, 0,50 l/s. Käyntiajalla painotettu virtaama lämpöpumpulla 1 oli 0,61 l/s. Lämpöpumpun 2 eli tehostuskäytössä olevan lämpöpumpun virtaama oli keskimäärin 0,55 l/s. Virtaamien mittaustuloksista (kuva 2) huomasi tehostuskäytössä olevan lämpöpumpun virtaaman nousun silloin, kun lämpöpumppu 1 oli kokonaan poissa käytöstä. Tällöin virtaama lämpöpumpussa 2 oli keskimäärin 0,67 l/s. Kuvassa 2 on mittaustulokset liuospiirin virtaamista. Kuvasta 2 näkee, miten lämpöpumput reagoivat toisiinsa: kun pumppu 2 käynnistyy, pumpun 1 virtaama laskee alle pumpun 2 virtaaman. Lisäksi kuvasta näkyy, että kun pumppu 1 oli poissa käytöstä, pumpun 2 virtaama oli suurempi kuin keskimääräinen pumpun 1 virtaama. Tehostuskäytön aikana pumppujen virtaama yhteensä oli keskimäärin 1,05 l/s.

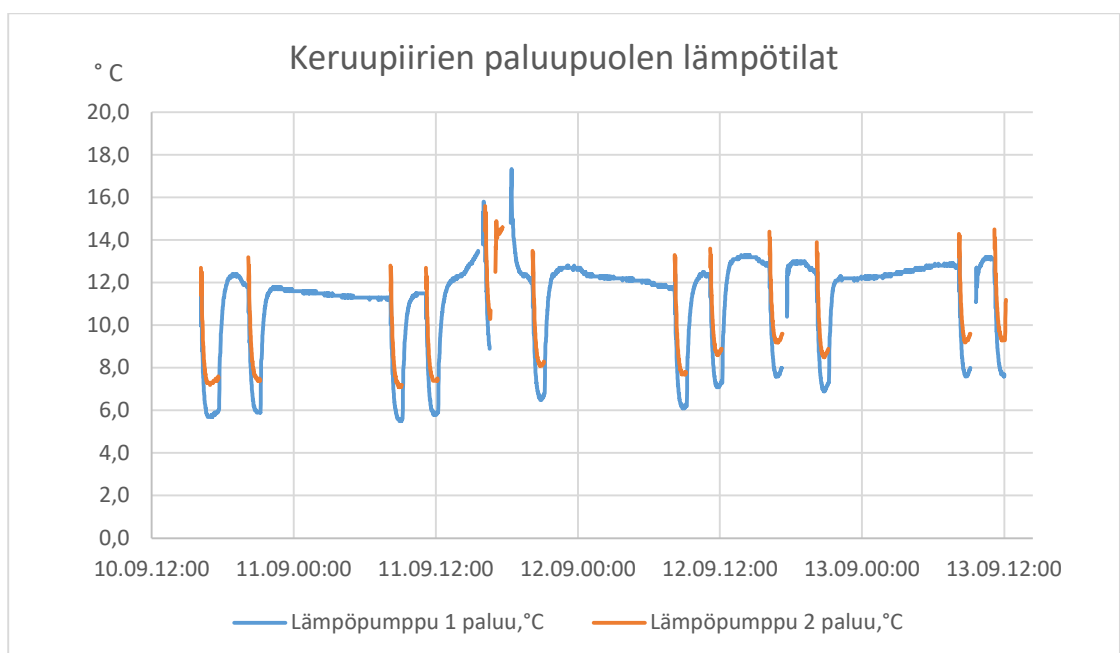


Kuva 2. Lämpöpumppujen 1 ja 2 liuospiirien virtaamat.



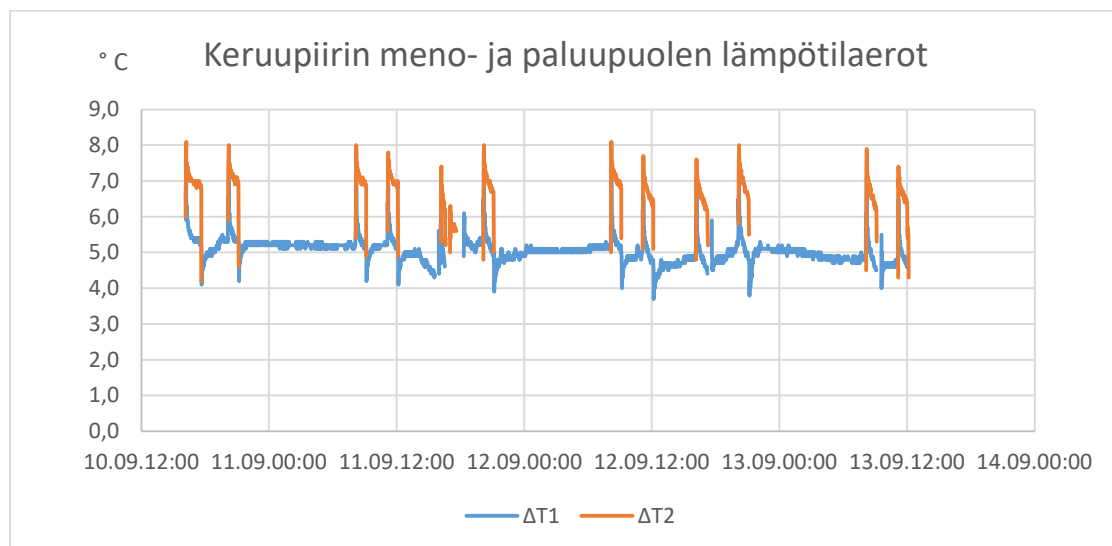
Kuva 3. Lämpöpumppujen keruupiirin menopuolen lämpötilat.

Liuoksen lämpötila vaihteli mittausjakson aikana lämpöpumpun keruupiirin menopuolella 0,2-11,2 °C ja paluupuolella 5,5-17,3 °C välillä. Kuvassa 3 näkyy keruupiirin liuoksen menopuolen lämpötilat kummallekin lämpöpumpulle. Kuvasta voi päätellä, että lämpötilat ovat yhteneväiset, kun lämpöpumput ovat yhtä aikaa käynnissä. Lämpöpumpun 1 lämpötilat nousevat, kun pumppu toimii yksin. Kummankin lämpöpumpun toimintakatko näkyy 11.9. iltapäivällä. Kuvasta 4 näkyy, että lämpöpumpun 2 paluulämpötila on suurempi kuin lämpöpumpun 1 paluulämpötila.



Kuva 4. Lämpöpumppujen keruupiirin paluupuolen lämpötilat.

Keskimääräinen meno-paluulämpötilan ero (Kuva 5) keruupiirissä oli normaali-käytön lämpöpumpussa 5,0 °C lämpöpumpun toimiessa yksin ja 5,3 °C läm-pöpumpun toimiessa yhdessä lämpöpumpun 2 kanssa. Tehostuskäytön läm-pöpumpussa keskimääräinen lämpötilaero oli 6,8 °C.



Kuva 5. Lämpötilaerot pumppujen liuospiirin meno- ja paluupuolella.

Liuospitoisuus mitattiin neljällä eri optisella laitteella, jotka markkinointinimenä tunnetaan pakkasnestemittareina. Mittari antaa tarkasteltavan liuoksen jäätymispisteen. Kolme neljästä optisesta laitteesta antoi liuoksen jäätymispisteeksi keskimäärin -31 °C ja yksi -32 °C. Kun jäätymispistettä verrattiin liitteessä 2 oleviin DOWCAL™200 -lämmönsiirtonesteen ominaisuuksiin, saatiin liuospi-toisuudeksi noin 49 %. Myös virtaamien mittaamisessa käytettiin liuospitoisuu-tena 49 %, sillä pitoisuus oli määriteltävä mittariin jo ennen mittaamisen aloit-tamista. Liuospitoisuus mitattiin myös ympäristötekniikan laboratoriossa hyd-rometrillä. Hydrometri eli toiselta nimeltään areometri on mittalaite, joka laite-taan kellumaan korkeassa ja kapeassa astiassa olevaan liukseen ja astian mitta-asteikolta luetaan tiheys. Mittaustulos luettiin silmämääräisesti as-teikolta, joka näyttää tiheyden lukemat 0,1 g/cm³ välein. Katsoin, että optisilla laitteilla mitattu liuospitoisuus antaa todennäköisemmän kuvan liuospitoisuu-desta. Hydrometrillä laskettu pitoisuus 20 °C lämpötilassa antoi tiheydeksi

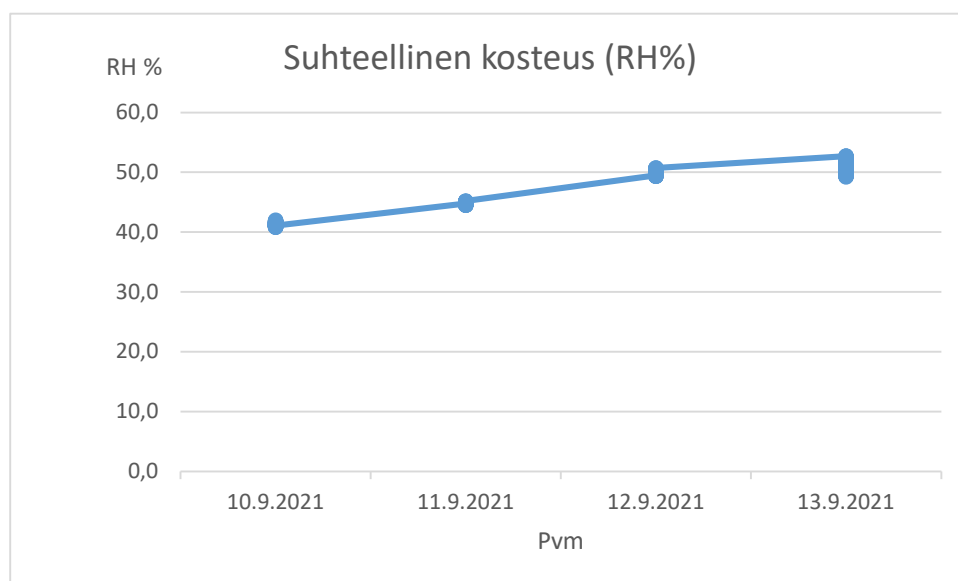
1,043 g/cm³, joka vastaa 45 %:n pitoisuutta DOWCAL™200 -taulukosta luet-
tuna (liite 2). Taulukossa 1 näkyy mittaustulokset liuospitoisuuden mittaami-
sesta.

Propyleeniglykoli-vesiseos		
Liuoksen lämpötila, ° C	Tiheys, g/cm ³	Liuospitoisuus, %
21,0	1,044	46,0
20,4	1,044	46,0
20,0	1,043	45,0

Optinen nestemittari:	Jäätymispiste, ° C:	Liuospitoisuus, %
1	-31	48,5
2	-31	48,5
3	-32	49,0
4	-31	48,5

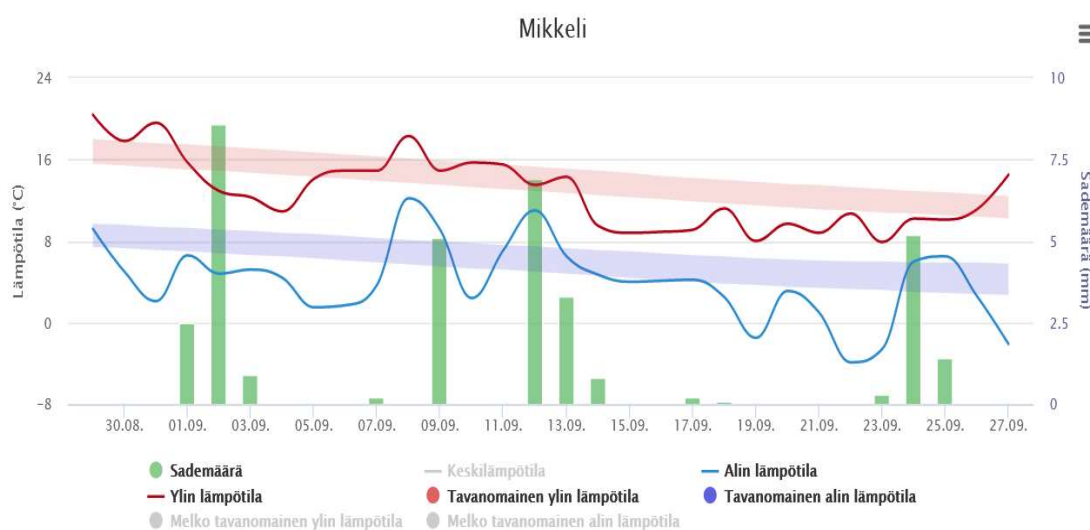
Taulukko 1. Liuospitoisuus. Tiheyden avulla ja optisella laitteella mitattuna.

Suhteellinen kosteusprosentti päästiin mittaamaan kerran päivässä noin 1-2
tunnin ajan ajalla 10.9.-13.9.2021. Mittari oli sijoitettu juuri ennen LTO-laitetta.
Suhteellinen kosteus tuona aikana tässä mittauspisteessä oli keskimäärin
47,1 °C.



Kuva 6. Suhteellinen kosteus poistoilmakanavassa ennen LTO-patteria.

Ulkoilman kosteus näyttää vaikuttavan suhteelliseen kosteusprosenttiin siten, että suurin RH-% saatiin 12.-13.9.2021 väliseltä ajalta, jolloin Mikkeliissä satoi vettä 3,3-6,9 mm (Kuva 7).



Kuva 7. Sää Mikkeliissä 30.8.-27.9.2021.

LTO-patterin jälkeinen suhteellisen kosteuden mittaaminen toteutettiin kerta mittauksena viisipistemenetelmällä, jotta saataisiin selville suhteellisen kosteuden suuruusluokka LTO-patterin jälkeen. Mittaus suoritettiin viiden minuutin mittauksena siten, että jokaisesta pisteestä mitattiin kosteusprosentti minuutin aikana. Näitä mittauksia tehtiin kolme peräkkäistä mittausta. Suhteellinen kosteus LTO-laitteen jälkeen oli keskimäärin 55 %. Tätä mittausta ei voida kohdistaa muihin mittauksiin, sillä mittausta tehtiin kaikkien muiden mittausten jälkeen.

Lämpöpumppujen ottaman sähkötehon mittaustuloksia (liite 3) otettiin ylös päivittäin ajalla 2.-9.9.2021, joten sähköteholukemia yhdessä virtaamien ja lämpötilojen kanssa ei voida kohdentaa ajallisesti, koska ajanjakso sähkötehonmittaukselle tehtiin ennen virtaamien ja lämpötilojen mittauksia. Sähkötehon mittaustulokseen sisältyy sekä kompressorin että kiertovesipumpun käyttämä sähköteho. Kahdeksan ensimmäistä päivää sähkötehomittari Fluke 433 oli kytkettynä lämpöpumppuun 1 (pumppu päällä yksin 19,5 h/vrk ja yhdessä toisen pumpun kanssa 4,5 h/vrk) ja sähkötehon käyntiajoilla painotettu keskiarvo oli mittaustulosten perusteella 3,94 kW. Normaalkäytön aikana käytetyn sähkötehon keskiarvo oli 3,92 kW ja tehostuskäytön keskiarvo oli 4,02 kW.

Keskiarvo sähköteholle lämpöpumpulla 2 oli 3,64 kW. Sähkötehon mittaustuloksia lämpöpumpulta 2 saatiin tehostuskäytön lisäksi tilanteessa, jossa lämpöpumppu 1 ei toiminut. Havaittavia muutoksia mittaustuloksissa ei löydetty sen perusteella oliko lämpöpumppu 2 käytössä yksin vai yhdessä lämpöpumpun 1 kanssa.

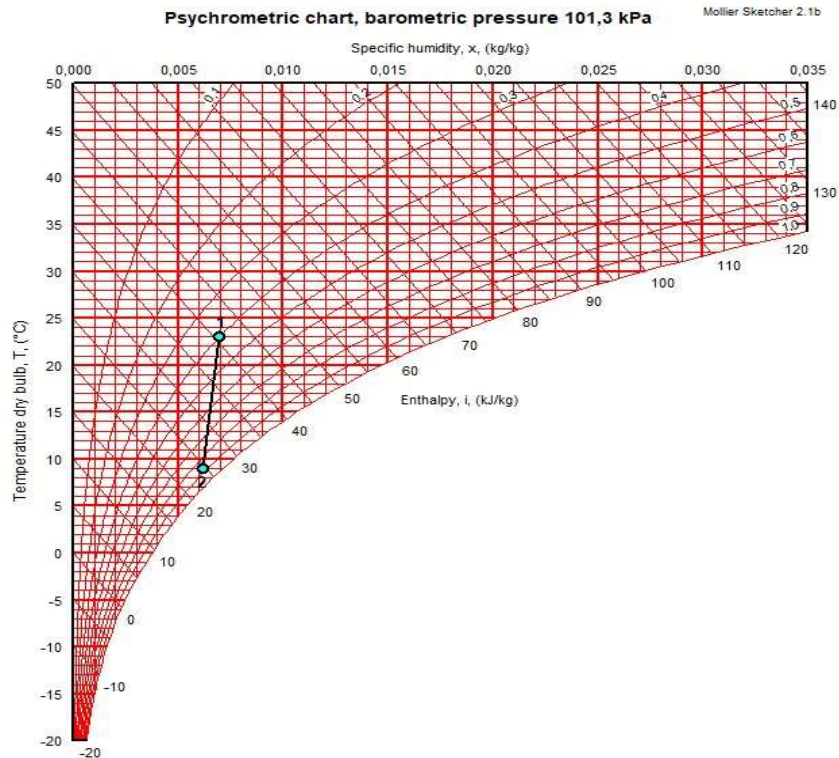
3.3 Tehon ja energian laskeminen

Teho laskettiin ensin suunnitteluarvojen mukaan. Sen jälkeen teho laskettiin mittaustulosten perusteella. Energiankulutus laskettiin lämpöpumppujen käyntiajoilla painotettuna ja kulutus normeerattiin eri vuosilta, jotta ne olisivat keskenään vertailukelpoisia. Sähkötehon ja lämpötehon tulosten perusteella laskettiin suuntaa antava lämpökerroin poistoilmalämpöpumpulle.

3.3.1 Suunnitteluarvojen mukaan laskettu teho

Koska poistoilma sisältää aina kosteutta, käytetään ilmavirrasta mitattaessa tehon kaavaa, jossa kosteuden kondensoituminen on otettu huomioon eli tiheys ja tilavuusvirta korvataan massavirralla ja ominaislämpökapasiteetti sekä lämpötilaero entalpiaerolla: $\phi = q_m \Delta h$, jossa ϕ =teho [kW], q_m =aineen massavirta [kg/s], Δh =entalpian muutos ennen ja jälkeen LTO-patteria ko. lämpötiloissa [kJ/kg].

Suunnitteluarvot ilman lämpötiloille ennen lämmöntalteenottopatteria on 23 °C ja LTO-patterin jälkeen 9 °C. Poistoilmavirta on mitattu asuntojen kaikista poistoilmakanavista ja kokonaispoistoilmavirraksi on saatu 1,3 m³/s. Tehoa laskettaessa otetaan huomioon myös kondensoituneen veden tuottama teho. Massavirta 1,3 m³/s:n ilmavirralla ja 1,2 kg/m³:n ilman tiheydellä on 1,3 m³/s x 1,2 kg/m³ = 1,56 kg/s. Entalpia on 23°C/RH 40:ssa % 40,9 kJ/kg ja 9°C/RH 87:ssa % 24,6 kJ/kg (kuva 2), josta entalpiaeroksi muodostuu 16,3 kJ/kg. Suhteelliset kosteusprosentit otettiin LTO-patterin suunnitteluarvoista. Näin poistoilmasta talteen otettu lämpöteho on laskennallisesti alkuarvoja käyttäen 25,43 kW.



Kuva 8. Entalpian muutos 23 °C:sta 9 °C:een. RH 40 %/23°C ja 87 %/9°C

Nestekierrossa käytettiin suunnitteluarvojen laskemisessa 30 %:sta vesi-etyleeniglykoli-seosta ja tehon kaavaa $\phi = \rho c_p q_v \Delta T$. Lämpötilaerolla 6 saatiin tulokseksi 24,95 kW, joka poikkesi ilmavirrasta sadusta tuloksesta 0,48 kW. Jos lämpötilaerona käytetään 6,116 °C, teho on sama kuin ilmavirrasta mitattu. Koska on kätevää käyttää kokonaislukuja, todetaan, että sekä ilmavirrasta että nestekierrosta laskettu suunnitteluarvojen mukainen teho on 25 kW.

Kohteessa käytäessä todettiin, että liuospiirissä käytettiin Dowcal 200 propyleeniglykolia. Dowcal -liuosseoksiin on olemassa dow.com -sivustolla Fluidfile -laskuri /11/, joka laskee liuoksen ominaisuudet, kun tiedetään lämpötila ja putken koko. Nestekierron tehoksi 30 %:n vesi-propyleeniglykoliseoksella, 5 °C:n liuoslämpötilalla, tiheydellä 1038,2 kg/m³, ominaislämpökapasiteetilla 3,83 kJ/kgK ja tarkalla lämpötilaerolla 7,867 °C saadaan 26,01 kW, joten nestekierrosta laskettu teho vesi-propyleeniglykoliseoksella on suurempi kuin vesi-etyleeniglykoli-seoksella laskettu teho.

Suunnitteluarvojen mukainen lämpöenergian talteenotto kuukaudessa on noin 11,1 MWh. Tähän lukuun päästään, kun kerrotaan saatu teho käyntiajalla normaali sekä tehostustilanteessa. Taulukossa 2 näkyvät ne arvot, joita on käytetty talteenotetun lämpöenergian määrää laskettaessa suunnitelluilla arvoilla. Suunnitelluissa arvoissa oletetaan nesteeksi Dowcal 200 30 %:n pitoisuudella.

Propyleeniglykoli-vesiseos 30%, DOWCAL
200,
laskettu FLUIDFILE-ohjelmalla

$c_{p,pgv,5^{\circ}C}=$	3,83 kJ/kgK
$\rho_{pgv,5^{\circ}C}=$	1038,2 kg/m ³
$q_v=$	0,00109 m ³ /s
$t_m=$	2 °C
$t_p=$	8 °C
Normaalitilanne:	
$\phi=$	13,0 kW
Tehostustilanne:	
$\phi=$	26,0 kW
Käyntiajat:	h/vrk
Normaali, $q_v=0,545$ l/s	19,5
Tehostus, $q_v=1,09$ l/s	4,5
Talteenotettu energia/kk:	
$Q=$	11272 kWh/kk

Taulukko 2. Suunnitteluarvojen mukaan laskettu energia.

3.3.2 Mittaustulosten perusteella laskettu teho

Liuospiirin nesteestä laskettu teho lasketaan kaavalla $\phi = \rho c_p q_v \Delta T$, jossa ϕ =teho [kW], ρ =aineen tiheys [kg/m³], c_p =aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kgK], q_v =aineen tilavuusvirta [m³/s] ja ΔT =lämpötilaero, lämpötila ennen ja jälkeen lamellipatteria [K]

Propyleeni-vesi-seoksen jäätymispiste oli hieman yli -31 °C, jolloin liitteestä 2 (DOWCAL™200 -lämmönsiirtonesteen teknisiä ominaisuuksia) katsottuna liuospitoisuudeksi määritetään noin 49 %. Syötettäessä Fluidfile -ohjelmaan /11/ liuoksen keskimääräiseksi lämpötilaksi 9 °C (lämpöpumpun 1 keskimääräinen lämpötila normaalikäytön aikana) ja liuospitoisuudeksi 49 %, tulee liuoksen ominaislämpökapasiteetiksi 3,56 kJ/kgK ja tiheydeksi 1053,4 kg/m³. Tällöin jäätymispiste on -31,8°C. Tilavuusvirta mittausjaksolla lämpöpumpusta 1 normaalikäytön aikana on $6,4 \cdot 10^{-4}$ m³/s ja lämpötilaero keskimäärin 5,0 K. Kun

nämä arvot sijoitetaan tehon kaavaan, saadaan lämpöpumpun 1 tehoksi normaalikäytön aikana 12 kW. Tehostuskäytön aikana lämpöpumpun 1 liuospiirin keskimääräinen lämpötila on 5,3 °C, virtaama $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ja Fluidfile -ohjelmalla lasketut nesteen ominaisuudet ovat 1 055,8 kg/m³ sekä 3,55 kJ/kgK. Teho lämpöpumpulla 1 tehostuskäytön aikana on $1\,055,8 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,55 \text{ kJ/kgK} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 5,3 \text{ K} = 9,9 \text{ kW}$.

Lämpöpumpun 2 tehoa laskettaessa Fluidfile -ohjelmaan syötetään keskimääräiseksi lämpötilaksi 6 °C liuospitoisuuden ollessa sama. Nyt ominaislämpökapasiteetti on 3,55 kJ/kgK ja tiheydeksi tulee 1 055,2 kg/m³. Keskimääräinen tilavuusvirta mittausjaksolla lämpöpumpusta 2 on $5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ja lämpötilaero keskimäärin 6,8 K. Näillä arvoilla laskettuna lämpöpumpun 2 tehoksi tulee 14 kW.

Liitteessä 4 on laskettu tehon määrän vaihtelu, kun muuttujana on liuospitoisuus. Liuospitoisuuden laskeminen vaikuttaa tehoon nousevasti, mutta kokonaisvaikutusta ei voida sanoa suoraan, koska liuoksen ominaisuuksien vaihtuessa myös virtaama voi vaihtua ja mittautuloksia virtaamista ei ole saatavissa eri pitoisuuksissa.

3.3.3 Energia käyntiajoilla painotettuna ja kulutuksen normeeraus

Kun lasketaan kuukausitasolla lämpöenergiaa, mitä poistoilmalämpöpumpulla saadaan käyttöön, teho kerrotaan kuukauden käyntiajalla. Kuukautena käytetään syyskuun päiviä. Tässä kohteessa lämpöpumppu 1 on käynnissä aina ja lämpöpumppu 2 4,5 tuntia vuorokaudessa. Lämpöpumppuihin on asennettu hälytysrajoja, jonka puitteissa lämpöpumput toimivat. Kun raja ylittyy tai alittuu, lämpöpumppu lakkaa toimimasta. Tässä kohteena olevassa tapauksessa otetaan huomioon, että lämpöpumput ovat päällä koko kuukauden. Kesäaikana lämpöpumput toimivat vain käyttöveden esilämmityksessä.

Mittausaikana lämpöpumppu 1 oli poissa päältä 3,5 % normaalikäytön aikana ja 8,9 % tehostuskäytön aikana. Lämpöpumppu 2 oli taas poissa päältä 1,4 % käyttöajasta. Jos käytetään mittausajan tietoja hyväksi syyskuun käyntiaikaa

laskettaessa, lämpöpumppu 1 on syyskuussa päällä 565 tuntia normaalikäytön aikana ja 123 tuntia tehostuskäytön aikana. Lämpöpumppu 2 on päällä 133 tuntia. Kun lämpöpumpun 1 ottamaksi lämpötehoksi kohdassa 3.3.2. laskettiin 12 kW normaalikäytön aikana ja 9,9 kW tehostuskäytön aikana, niin syyskuussa poistoilmasta talteenotettu lämpöenergian määrä on ollut noin 8000 kWh. Lämpöpumpun 2 teho oli kohdassa 3.3.2. laskettuna 14 kW, joten syyskuussa poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia on ollut noin 1 860 kWh. Yhteenlaskettu saatu lämpöenergia kuukausitasolla on siten noin 9 900 kWh

Kun lasketaan kaukolämmön energiankulutusta ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen, täytyy eri vuosien syyskuun luvut normeerata, jotta nämä olisivat vertailukelpoisia keskenään. Normeeraus lasketaan rakennuksen lämmönkulutukselle eli lämpimän käyttöveden osuutta ei normeerata. Tässä kohteessa on tieto saatavissa toteutuneesta rakennuksen lämmönkulutuksesta jo valmiiksi, joten toteutuneesta kulutuksesta ei enää tarvitse vähentää käyttöveden lämmitykseen menevää energiankulutusta. Kaava, jota normeeratun energiankulutuksen saamiseksi nyt käytetään, näkyy kuvassa 9.

$Q_{norm}=K1 * S_N/S * Q_{toteutunut}$	
$K1=$	paikkakuntakohtainen korjauskerroin lämmöntarveluvulle (Mikkeli)
$S_N=$	normaalikuukauden lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla (Lappeenranta)
$S=$	toteutunut lämmöntarveluku kuukausitasolla vertailupaikkakunnalla (Lappeenranta)
$Q_{norm}=$	toteutunut energiankulutus kuukausitasolla

Kuva 9. Kaava, jota käytetään kulutustietojen normeerauksessa.

Mikkelin vertailupaikkakuntana normeeratun energiankulutuksen laskemisessa on Lappeenranta. Kulutuksen normituksesta on tietoa Motivan internet-sivuilla. Sivustolta löytyy taulukot lämmitystarvelukujen kuntakertoimille, laskentakaavat tiedostona sekä linkki ilmatieteenlaitoksen internetsivuille toteutuneisiin lämmitystarvelukuihin.

Kun käytetään normeerattuja energiankulutuksen tietoja kaukolämmön energiankulutuksesta ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen, huomataan,

että energiankulutus on pienentynyt keskimäärin 10 500 kWh syyskuussa.
(Taulukko 3).

Vuosi	2009	2010	2011	2012	2013	2017	2018	2019	2020
S	116	154	91	154	96	180	111	176	98
S _N	184	184	184	184	184	184	184	184	184
K1	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
Q _{toteutunut}	12321	15245	15944	16145	15225	10196	9348	6326	10051
Q _{norm}	18957	17668	31271	18711	28306	10110	15031	6415	18305
Keskiarvoinen kaukolämmön normeerattu energiankulutus syyskuussa 2009-2013:									
22983	kWh/kk								
Keskiarvoinen kaukolämmön normeerattu energiankulutus syyskuussa 2017-2020									
12465	kWh/kk								
Normeeratun energiankulutuksen keskimääräinen aleneminen/kk:									
10518	kWh/kk								

Taulukko 3. Normeerattu kaukolämmön energiankulutuksen muutos ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen.

3.4 Poistoilmalämpöpumppujen lämpökerroin ja sähkönkulutus

Lämpöpumpun lämpökerroin, COP, tarkoittaa siirretyn lämpömäärän, tässä kohteessa lämpöpumpun tuottaman tehon ja kompressorin käyttämän sähkötehon summan, suhdetta käytettyyn työhön, tässä kohteessa kompressorin käyttämään sähkötehoon. Koska mittaustietoja ei ole saatavilla samalta ajanjaksolta, voidaan esittää vain suuntaa antava lämpökerroin näille kohteessa oleville lämpöpumpuille keskimääräisen sähkötehon lukemien perusteella.

Liitteessä 3 näkyvien, mitattujen sähkötehojen, keskiarvo lämpöpumpulla 1 oli normaalikäytön aikana 3,92 kW ja tehostuskäytön aikana 4,02 kW. Lämpöpumpun 2 keskiarvoinen sähköteho oli 3,64 kW. Lämpöpumpun 1 kohdassa 3.3.2. laskettu normaalikäytön lämpöteho on 12 kW, joten lämpökertoimeksi normaalikäytön aikana (COP) tuli $(12 \text{ kW} + 3,92 \text{ kW}) / 3,92 \text{ kW} = 4,1$. Tehostuskäytön ajalta laskettu COP lämpöpumpulle 1 on $(9,9 \text{ kW} + 4,02 \text{ kW}) / 4,02 \text{ kW} = 3,5$. Käyntiajoilla painotettu COP lämpöpumpulle 1 on 4,0. Lämpöpumpun 2 kohdassa 3.3. laskettu lämpöteho oli 14 kW, joten lämpöpumpulle 2 laskettu lämpökerroin on $(14 \text{ kW} + 3,64 \text{ kW}) / 3,64 \text{ kW} = 4,8$.

Taulukossa 4 on sähkönkulutustietoja. Sähkön kulutus oli noussut poistoilma-
lämpöpumppujen asentamisen jälkeen noin 25 200 kWh vuodessa.

Vuosi	Kulutus/vuosi kWh	Kulutus/vuosi MWh
2020	40233	40
2019	46905	47
2018	40106	40
2014	18559	19
2013	16269	16
2012	16779	17
Sähkön kulutus keskimäärin ennen lämpöpumppuja		
	17202 kWh	
Sähkön kulutus keskimäärin lämpöpumppujen jälkeen		
	42415 kWh	
Sähkönkulutuksen nousu vuodessa keskimäärin		
	25212 kWh	

Taulukko 4. Sähkönkulutuksen muutos lämpöpumppujen asentamisen jälkeen.

4 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tämän opinnäytetyön tavoite oli saada toteutuneiden virtaamien, lämpötilojen ja liuospitoisuuden mittaamisen avulla tietoa todellisesta lämpöpumppujen antamasta hyödystä eli miten paljon lämpöpumpuilla saatiin otettua lämpöä talteen poistoilmasta. Toiseksi mitattuja tuloksia oli tarkoitus verrata suunnittelu-arvoihin. Kolmanneksi analysoitiin suhteellisen kosteuden vaikutusta tehoon. Koska mittausjakso, jolta saimme kattavia mittaustuloksia, oli lyhyt (perjantaita maanantaihin), arviointiajanjaksoksi valittiin kuukausitaso vuositason arviointiajanjakson sijasta. Taulukossa 5 on suunnitteluarvot ja mittaustulokset virtaamista, meno- ja paluulämpötiloista, lämpötilaeroista, nesteen ominaisuuksista sekä laskettu teho.

Lämpöpumppu 1	Vir- taama l/s	Meno- lämpötila ° C	Paluu- lämpötila ° C	Lämpö- tilaero K	Ominaislämpö- kapasiteetti kJ/kgK	Tiheys kg/l	Teho kW
Suunnitteluarvo							
Normaalikäyttö	0,55	2	8	6	3,65	1,058	12,7
Tehostuskäyttö	0,55	2	8	6	3,65	1,058	12,7
Mittaustulos							
Normaalikäyttö	0,64	7,1	12,1	5,1	3,56	1,053	12,2
Tehostuskäyttö	0,50	2,2	7,5	5,3	3,55	1,053	9,9

Lämpöpumppu 2	Vir- taama l/s	Menoläm- pötila ° C	Paluuläm- pötila ° C	Lämpöti- laero K	Ominaislämpöka- pasiteetti kJ/kgK	Tiheys kg/l	Teho kW
Suunnitteluarvo	0,55	2	8	6	3,65	1,058	12,7
Mittaustulos							
Kun pumppu toimi rinnak- kain pumpun 1 kanssa	0,55	2,5	9,3	6,8	3,55	1,055	14,0
Kun pumppu toimi yksin	0,67	7,4	13,1	5,7	3,56	1,053	14,3

Taulukko 5. Suunnitteluarvot ja mittaustulokset

Pumppu 1 ei toimi aivan yhtä tehokkaasti tehostuskäytön aikana, mitä suunnitteluarvoissa on laskettu, kun taas pumppu 2 toimii suunnitteluarvoja tehokkaammin. Yhdessä nämä toimivat 1,5 kW suunnitteluarvoa heikommin. Pumpun 2 suuri lämpötilaero johtuneen siitä, että meno-paluulämpötilojen tasoittuminen vie aikaa pumpun käynnistymisen jälkeen.

Virtaama ja liuospiirin nesteen lämpötila vaikuttavat toisiinsa siten, että kun virtaama pienenee eli liuoksen vauhti putkessa hidastuu, samalla liuoksen lämpötila laskee. Mittaustuloksissa eron huomaa lämpöpumpussa 1, joka käy sekä normaali- että tehostustilanteen aikana. Lämpötilaero kasvoi, kun virtaama väheni ja nesteen lämpötila aleni.

Kaukolämmön energiankulutus aleni poistoilmalämpöpumppujen asentamisen jälkeen kuukausitasolla 10 500 kWh/kk. Kaukolämmön hinta vuonna 2021 (Etelä-Savon Energia) on ollut keskimäärin 77 e/MWh. Energian hinta on siten ollut kuukausitasolla noin 800 euroa vähemmän. Samaan aikaan sähkönkulutus on noussut kuukausitasolla noin 2 100 kWh, kun vuotuinen sähkönkulutuksen nousu jaetaan kuukautta kohti. Sähköenergian, sähköveron ja sähkönsiirron hinta on saatu käyttäen Lumme Energian ja Etelä-Savon Energian hinnastoja ja hinta/kWh on 0,13 e/kWh. Sähkönkulutuksen hinnan nousu on siten

270 e/kk. Kokonaistaloudellisesti poistoilmalämpöpumppujen asentaminen on vähentänyt taloyhtiön kustannuksia noin 530 e/kk. Hinnan muodostuminen on tehty keskimääräisiä taulukoita apuna käyttäen ja ei ole todellisuutta tarkalleen vastaava, mutta antaa tiedon, että käyttökustannushyötyä on tullut.

5 POHDINTA

Opinnäytetyön tekemisen prosessi näytti, että on monta epävarmuustekijää, jotka on otettava huomioon mittaustuloksia analysoitaessa. Ensisijaisen tärkeää on, että mittaaaja tietää miten mittareita käytetään ja millä keinoin mittarit ottavat dataa mitattavasta kohteesta.

Mittausaikana huomattiin, että tieto lämpöpumppujen vikahälytystilasta ei ole mahdollista saada eteenpäin tunneissa tai päivissäkään. Kun tekniseen tilaan, jossa lämpöpumput sijaitsivat, tultiin ensimmäisen kerran, huomattiin, että normaalikäytön lämpöpumppu oli ollut jo lähes viikon poissa käytöstä korkeapaineanturin ylärajahälytyksen takia. Tällainen vika on korjattava ja kuitattava lämpöpumpusta manuaalisesti, jotta pumppu lähtisi taas käyntiin. Tähän ongelmaan ratkaisuna on, että kiinteistönhuoltaja katsoo lämpöpumppujen toimintatilan säännöllisesti. Jos taas kyse on lämpötilojen normaalista ylärajan tai alarajan ylittymisestä, lämpöpumppu kytkeytyy päälle ja pois automaattisesti.

Ajatustyön alle joutuu myös virtaamalukemat tehokäytön aikana. Tarkasteltavaksi jää, miksi virtaama pienenee normaalikäytön lämpöpumpussa tehostuskäytön aikana.

Kaukolämmön normeerattu energiankulutuksen väheneminen poistoilmalämpöpumppujen asentamisen jälkeen oli kuukausitasolla noin 10 500 kWh. Luke-
mat saatiin noin viideltä vuodelta ennen ja jälkeen lämpöpumppujen asentamisen. Kokonaisenergiankulutuksen väheneminen prosentteina oli 46 %, mikä vastaa samaa suuruusluokkaa, missä muutkin poistoilmalämpöpumpulla varustetut kerrostalot Suomessa ovat. Samalla, kun lämpöpumput asennettiin, kohteeseen tehtiin linjasaneeraus ja julkisivuremontti. Linjasaneerauksessa

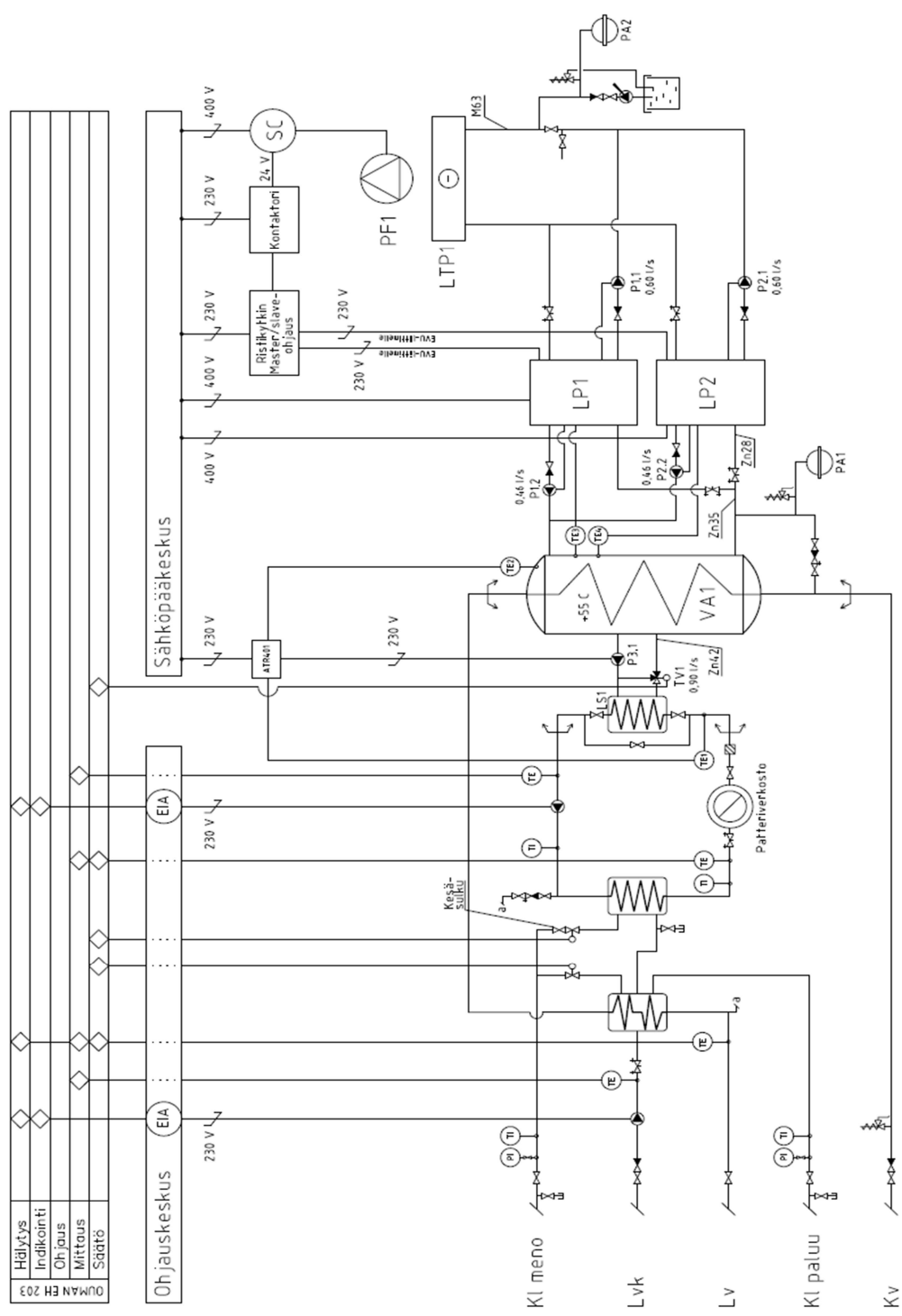
lämmitysverkosto säädettiin ja tasapainotettiin ja julkisivuremontissa vaihdettiin ikkunat uusiin. Nämä toimenpiteet alentavat osaltaan kokonaisenergiankulutusta, joten osa energiankulutuksen alenemisesta johtuu myös muista teko-
jöistä kuin lämpöpumppujen asentamisesta.

LÄHTEET

1. Eurooppa-neuvosto 2021. Neuvosto hyväksyi eurooppalaisen ilmastolain. Lehdistötiedote 28.6.2021. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2021/06/28/council-adopts-european-climate-law/>
2. Valtioneuvosto 14.4.2021. Ministerityöryhmien johtopäätökset tilannearviosta. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://ym.fi/hiilineutraali-suomi2035>
3. Työ- ja elinkeinoministeriö 2021. Uusiutuvan energian näkymät. PDF-dokumentti 17.6.2021. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163251>
4. Perälä, O., Perälä, R. 2013. Lämpöpumput. Suomalainen käsikirja aikamme lämmitysjärjestelmästä. Helsinki: Alfamer/Karisto Oy.
5. Rämä, M., Niemi, R., Similä, L. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. VTT:n asiakasraportti. PDF-dokumentti 8.9.2015. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2015/VTT-CR-00564-15.pdf>
6. Energiateollisuus 2020. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2020. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/rakennusten_kaukolammitys_maaraykset_ja_ohjeet_julkaisu_k1_2020.html#material-view
7. Energiateollisuus 2017. Poistoilmalämpöpumppu (PILP) kaukolämpöta-
loon: ohjeet suunnittelijalle. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/poistoilmalampopumppu \(pilp\) kaukolampotaloon ohjeet suunnittelijalle.html](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/poistoilmalampopumppu_pilp_kaukolampotaloon_ohjeet_suunnittelijalle.html)
8. Metsämuuronen, J. 2008. Laadullisen tutkimuksen perusteet. Metodologia –sarja 4.
9. Lapp Automaatio Oy 2021. Miten toimii TE-anturi (termoelementti)? Usein kysyttyjä kysymyksiä. Yrityksen internetsivut. Katsottu 24.9.2021. Saatavissa: <https://www.epicsensors.fi/faq/miten-te-anturi-toimii/>
10. Dow 2021. DOWCAL™ +Lämmönsiirtonesteet. Technical Data Sheet. Saatavissa englanniksi: <https://www.dow.com/en-us/document-viewer.html?randomVar=1544654656905876122&docPath=/content/dam/dcc/documents/en-us/productdatasheet/180/180-01589-01-dowcal-200-heat-transfer-fluid-tds.pdf>
11. Dow 2021. Fluidfile -ohjelma. Yrityksen nettisivut. Saatavissa: https://www.dow.com/content/dcc/en-us/category/market/mkt-building-construction/sub-build-heating-cooling-refrigeration/heat-transfer-fluid-glycol-based-calculator?ffc_region=EU&ffc_type=glycol

LIITTEET

Liite 1.
Toimintakaavio poistoilmalämpöpumppujen liitännästä kaukolämpöön.



Liite 2.

DOWCAL® 200 -nesteen tyypilliset jäätymis- ja kiehumispisteet sekä muut ominaisuudet*

DOWCAL® 200 til-%	DOWCAL® 200 paino-%	Jäätymispiste °C	Tiitekerroin, lämpöt. 20 °C	Kiehumispiste °C, paine 1 bar	Tihays. g/cm³, lämpöt. 20 °C	Dyn. viskositeetti, mPa.s, lämpöt. 20 °C	Kin. viskositeetti, mm²/s, lämpöt. 20 °C
5,0	5,3	-1,6	1,3391	100	1,006	1,36	1,95
10,0	10,5	-3,3	1,3452	100	1,011	1,62	1,66
15,0	15,8	-5,3	1,3513	101	1,015	1,93	1,81
20,0	20,9	-7,5	1,3573	101	1,020	2,30	2,11
21,0	22,0	-8,0	1,3585	101	1,021	2,39	2,18
22,0	23,0	-8,5	1,3597	101	1,022	2,48	2,26
23,0	24,0	-9,1	1,3609	102	1,022	2,57	2,34
24,0	25,1	-9,6	1,3621	102	1,023	2,66	2,42
25,0	26,1	-10,2	1,3633	102	1,024	2,76	2,51
26,0	27,1	-10,8	1,3645	102	1,025	2,87	2,61
27,0	28,2	-11,4	1,3657	102	1,026	2,97	2,71
28,0	29,2	-12,1	1,3669	102	1,027	3,09	2,81
29,0	30,2	-12,7	1,3681	102	1,028	3,20	2,92
30,0	31,2	-13,4	1,3693	102	1,029	3,33	3,04
31,0	32,3	-14,1	1,3704	102	1,030	3,45	3,16
32,0	33,3	-14,8	1,3716	102	1,031	3,58	3,29
33,0	34,3	-15,6	1,3728	102	1,032	3,72	3,42
34,0	35,3	-16,4	1,3739	102	1,033	3,87	3,56
35,0	36,3	-17,2	1,3751	102	1,034	4,02	3,70
36,0	37,4	-18,0	1,3762	103	1,035	4,17	3,85
37,0	38,4	-18,9	1,3774	103	1,036	4,34	4,01
38,0	39,4	-19,8	1,3785	103	1,037	4,51	4,17
39,0	40,4	-20,7	1,3797	103	1,038	4,68	4,35
40,0	41,4	-21,7	1,3808	103	1,039	4,87	4,53
41,0	42,4	-22,7	1,3820	103	1,039	5,06	4,71
42,0	43,4	-23,7	1,3831	103	1,040	5,26	4,91
43,0	44,4	-24,8	1,3842	103	1,041	5,47	5,12
44,0	45,4	-25,8	1,3853	103	1,042	5,69	5,33
45,0	46,4	-27,0	1,3864	103	1,043	5,92	5,55
46,0	47,5	-28,1	1,3875	104	1,044	6,16	5,79
47,0	48,5	-29,3	1,3886	104	1,045	6,40	6,03
48,0	49,5	-30,5	1,3897	104	1,046	6,66	6,29
49,0	50,5	-31,8	1,3908	104	1,047	6,93	6,55
50,0	51,5	-33,1	1,3919	104	1,048	7,22	6,83
51,0	52,5	-34,5	1,3930	105	1,048	7,51	7,12
52,0	53,5	-35,9	1,3941	105	1,049	7,82	7,42
53,0	54,4	-37,3	1,3951	105	1,050	8,14	7,74
54,0	55,4	-38,7	1,3962	105	1,051	8,48	8,07
55,0	56,4	-40,3	1,3973	105	1,052	8,83	8,41
56,0	57,4	-41,8	1,3983	106	1,053	9,20	8,77
57,0	58,4	-43,4	1,3993	106	1,053	9,58	9,14
58,0	59,4	-45,0	1,4004	106	1,054	9,98	9,54
59,0	60,4	-46,7	1,4014	106	1,055	10,4	9,94
60,0	61,4	-48,5	1,4024	107	1,056	10,8	10,4
65,0	66,3	-51	1,4074	108	1,059	13,3	12,8
70,0	71,2	-51	1,4122	109	1,062	16,5	15,8
75,0	76,1	-51	1,4168	111	1,064	20,4	19,5
80,0	80,9	-51	1,4212	113	1,066	25,4	24,1
85,0	85,7	-51	1,4253	116	1,066	31,6	29,8
90,0	90,5	-51	1,4291	121	1,065	39,5	36,9
95,0	95,3	-51	1,4327	129	1,062	49,5	45,7
100,0	100,0	-51	1,4360	142	1,057	62,3	56,5

*Tyypillisiä ominaisuuksia,
ei pidä käsittää tekniseksi
erittelyksi.

* Lämpötilariippuvaiset
fysikaaliset
ominaisuudet saa
seville FLUIDFILE®-
ohjelmistolla.

Turvamarginaalin takia
kannattaa valita tästä
taulukosta lämpötila,
joka on vähintään 3 °C
alhaisempi kuin alin
odotettavissa oleva
ympäristön lämpötila.
Kysy tarvittaessa
Dow:ta lisätietoja
erikoistapauksivarten.

Liite 3. Sähkötötehon mittaustulokset

Lämpöpumppu 1, sähkötötehon mittaustulokset

Pvm, aika	Teho, kW	N/T/O
02.09.2021 10:35:00	3,68	N
02.09.2021 10:36:00	3,69	N
02.09.2021 11:07:00	3,52	N
02.09.2021 12:04:00	3,69	T
02.09.2021 15:07:00	3,91	N
03.09.2021 11:38:00	3,83	T
03.09.2021 11:44:00	3,86	T
03.09.2021 11:54:00	3,90	T
03.09.2021 11:56:00	3,92	T
03.09.2021 12:05:00	3,98	T
03.09.2021 12:10:00	4,11	N
03.09.2021 12:13:00	4,08	N
06.09.2021 11:05:00	3,72	N
06.09.2021 13:40:00	3,97	N
06.09.2021 17:14:00	3,97	T
06.09.2021 17:20:00	4,02	T
06.09.2021 17:27:00	4,15	T
06.09.2021 17:32:00	4,23	T
06.09.2021 17:44:00	4,45	N
07.09.2021 16:02:00	4,07	N
07.09.2021 16:17:00	4,00	T
07.09.2021 16:26:00	4,32	T
07.09.2021 16:28:00	4,40	T
07.09.2021 16:50:00	0,00	O
08.09.2021 09:00:00	3,91	N

N=normaalikäyttö

T=tehostuskäyttö

O=ei toiminnassa

maksimi	4,45 kW
minimi, pl 0-tilanne	3,52 kW
keskiarvo, pl 0-tilanne	3,97 kW
keskipoikkeama, pl 0-tilanne	0,17 kW
keskiarvo normaalikäytössä	3,92 kW
keskiarvo tehostuskäytössä	4,02 kW
kokonaissähkötötehon kulutus/142 h	551,90 kWh

Lämpöpumppu 2, sähkötötehon mittaustulokset

Pvm, aika	Teho, kW	N/T/O
08.09.2021 09:03:00	3,85	T
08.09.2021 11:08:00	0,55	T
08.09.2021 11:08:00	3,96	T
08.09.2021 11:09:00	3,62	T
08.09.2021 11:09:00	3,70	T
08.09.2021 11:10:00	3,66	T
08.09.2021 11:12:00	3,70	T
08.09.2021 11:13:00	3,68	T
08.09.2021 16:15:00	4,35	T
08.09.2021 16:15:00	4,36	T
08.09.2021 16:16:00	4,40	T
08.09.2021 16:19:00	4,29	T
08.09.2021 16:19:00	4,24	T
09.09.2021 08:39:00	3,33	T
09.09.2021 08:39:00	3,34	T
09.09.2021 08:40:00	3,36	T
09.09.2021 08:42:00	3,37	T
09.09.2021 08:43:00	3,39	T
09.09.2021 08:45:00	3,41	T
09.09.2021 08:46:00	3,42	T
09.09.2021 08:47:00	3,43	T
09.09.2021 08:49:00	3,44	T
09.09.2021 08:51:00	3,45	T
09.09.2021 08:56:00	3,42	T
09.09.2021 08:58:00	3,43	T
09.09.2021 08:59:00	3,44	T
09.09.2021 09:01:00	3,46	T
09.09.2021 09:03:00	3,45	T
09.09.2021 09:05:00	3,46	T
09.09.2021 09:05:00	3,47	T
09.09.2021 09:06:00	3,47	T
09.09.2021 09:06:00	3,48	T
09.09.2021 09:07:00	3,49	T
09.09.2021 09:08:00	0,59	T

maksimi	4,40 kW
minimi, pl rivit 38 ja 70	3,33 kW
keskiarvo, pl rivit 38 ja 70	3,64 kW
keskipoikkeama	0,26 kW
kokonaissähkötötehon kulutus/24 h	17,40 kWh
Käyntiaika, lämpöpumppu 2:	
8.9.2021	3,58 h
9.9.2021	1,00 h

Liite 4. Liuospitoisuuden vaikutus tehoon mitatuilla ja suunnitteluarvoilla lämpöpumpuilla 1 ja 2.

Propyleeni-vesi-seos, mitatut nesteen lämpötilat, tilavuusvirrat ja ΔT lämpöpumppu 1, normaali-käyttö

Nesteen lämpötila ° C	Pitoisuus %	Tiheys kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK	Tilavuusvirta m ³ /s	ΔT K	Teho kW
9	30	1035,8	3,84	0,00064	5	12,7
9	35	1043,5	3,78	0,00064	5	12,6
9	40	1045,2	3,7	0,00064	5	12,4
9	45	1049,8	3,63	0,00064	5	12,2
9	49	1053,4	3,56	0,00064	5	12,0

Propyleeni-vesi-seos, mitatut nesteen lämpötilat, tilavuusvirrat ja ΔT lämpöpumppu 1, tehostuskäyttö

Nesteen lämpötila ° C	Pitoisuus %	Tiheys kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK	Tilavuusvirta m ³ /s	ΔT K	Teho kW
5	30	1038,2	3,83	0,0005	5	9,9
5	35	1043,0	3,77	0,0005	5	9,8
5	40	1047,7	3,69	0,0005	5	9,7
5	45	1052,2	3,61	0,0005	5	9,5
5	49	1055,8	3,55	0,0005	5	9,4

Propyleeni-vesi-seos, mitatut nesteen lämpötilat, tilavuusvirrat ja ΔT lämpöpumppu 2

Nesteen lämpötila ° C	Pitoisuus %	Tiheys kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK	Tilavuusvirta m ³ /s	ΔT K	Teho kW
6	30	1038,2	3,83	0,00055	6,8	14,9
6	35	1043,0	3,77	0,00055	6,8	14,7
6	40	1047,7	3,69	0,00055	6,8	14,5
6	45	1051,6	3,62	0,00055	6,8	14,2
6	49	1055,2	3,55	0,00055	6,8	14,0

Propyleeni-vesi-seos, suunnitteluarvojen mukaiset nesteen lämpötilat, tilavuusvirrat ja ΔT

Nesteen lämpötila ° C	Pitoisuus %	Tiheys kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti kJ/kgK	Tilavuusvirta m ³ /s	ΔT K	Teho kW
5	30	1038,2	3,83	0,00055	6	13,1
5	35	1043,0	3,77	0,00055	6	13,0
5	40	1047,7	3,69	0,00055	6	12,8
5	45	1052,2	3,61	0,00055	6	12,5
5	49	1055,8	3,55	0,00055	6	12,4