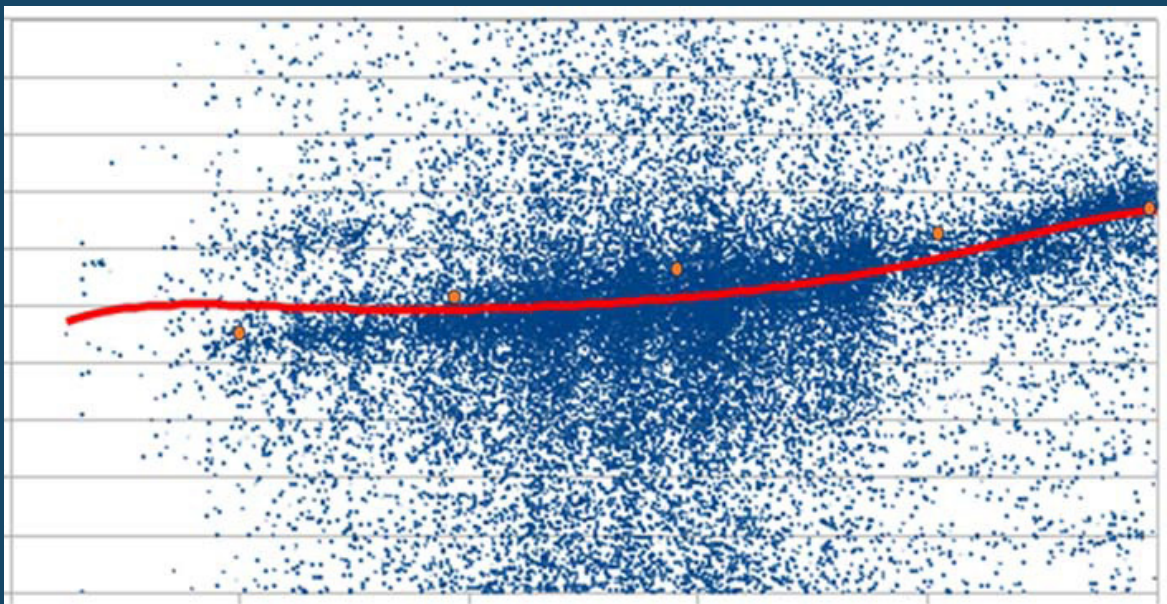


Leimu Juha, Niemelä Antti,  
Tuomaala Erkki, Vainio Juho

# Ilma-vesilämpöpumpun toiminta kiinteistön lämmönlähteenä

Mittaustutkimus kerrostalokiinteistössä



Leimu Juha, Niemelä Antti, Tuomaala Erkki, Vainio Juho

# Ilma-vesilämpö- pumpun toiminta kiinteistön lämmön- lähteenä

Mittaustutkimus kerrostalokiinteistössä

Turun ammattikorkeakoulun raportteja 293  
Turun ammattikorkeakoulu  
Turku 2023

ISBN 978-952-216-861-0 (pdf)  
ISSN 1459-7764 (elektroninen)  
<https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-216-861-0>

Turun AMK:n sarjajulkaisut: [turkuamk.fi/julkaisut](https://turkuamk.fi/julkaisut)

# Sisältö

---

Tiivistelmä .....	4
Johdanto .....	5
1 Tutkimuksen kohdekiinteistö .....	7
1.1 Lämmitysjärjestelmä .....	9
1.2 Lämpimän käyttöveden lämmitys .....	18
1.3 Järjestelmään ennen vuoden mittausjaksoa tehdyt muutokset .....	22
2 Lämpöpumppu .....	24
2.1 Lämpöpumppuprosessi .....	24
2.2 Kohteen NIBE-lämpöpumput .....	26
2.3 Sulatuksen tarve .....	29
3 Järjestelmän instrumentointi .....	30
3.1 Mittausjärjestelmän laatuvaatimukset .....	32
3.2 Järjestelmän ohjelmistototeutus .....	32
3.3 Valittu instrumentointi .....	33
3.4 Mittauksen käynnistyminen ja mittausjakso .....	34
4 Lämpöpumpun toiminta mittausten valossa .....	36
4.1 Tuotetut lämpömäärät ja lämpökertoimet .....	37
4.2 Häviöt .....	43
4.3 Sulatus .....	44
4.4 Käyttöveden lämpötila .....	48
4.5 Vaihtoventtiilin vuoto mittausjakson aikana .....	51
5 Laitoksen energiatalous kokonaisuutena .....	53
6 Yhteenveto ja johtopäätökset .....	56
Lähteet .....	58

# Tiivistelmä

---

Lämpöpumppujärjestelmien kehittyessä ovat ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävät lämpöpumput nousseet varteenotettavaksi vaihtoehdoksi maalämpöjärjestelmille yhä suuremmissa kiinteistöissä. Maalämpöjärjestelmät edellyttävät usein satoja metrejä kallioon porattavaa reikää kallioon lämmönlähteeksi. Ulkoilmalämpöpumppu taas tulee paikoilleen yhdellä nostolla, eikä porauksia tarvita. Mittauksiin perustuvaa tietoa ilma-vesilämpöpumppujen toiminnasta ja suorituskyvystä meidän ilmasto-olosuhteissamme on saatavana hyvin vähän. Tähän puutteeseen pyritään vastaamaan tällä kerrostalossa toteutetulla mittaushankkeella.

Tutkimuskohteeksi valikoitui kerrostalokiinteistö, jossa on lämmönlähteenä kolme rakennuksen ulkopuolelle sijoitettua suorahöyrysteistä lämpöpumppuyksikköä, joissa lämmitysverkon vesi kiertää. Laitokseen asennettiin noin sata lämpö-, virtaus- ja virtaanturia, joiden lukemat tallennettiin palvelimelle minuutin välein vuoden kestävä tutkimusjakson ajan. Laitoksen toiminnan tarkastelu perustuu näin kertyneen tietokannan analyysiin.

Lämpöpumput toimivat odotusten mukaisesti. Kun huippukuormitusten kattamiseen käytetty sähköenergia ja lämpöpumppujen käyttämä sähkö otettiin huomioon, muodostui laitoksen vuosilämpökertoimeksi 2,8. Tutkimuksen yhteydessä selvitettiin myös höyrystinpattereiden sulatusenergian vaikutusta laitoksen energiatalouteen sekä ulkoilman lämpötilan ja kosteuden vaikutusta sulatusenergian tarpeeseen. Lämpöpumppujen tuotamasta energiasta noin 5 prosenttia käytettiin sulatukseen. Järjestelmä ei ylläpitänyt määräysten edellyttämää käyttöveden lämpötilatasoa. Laitoksen monimutkainen vesikierto ei aina toiminut suunnitellulla tavalla. Vesikierron kehittäminen tarjoaa mahdollisuuksia laitoksen vuosilämpökertoimen nostoon.

Turun ammattikorkeakoulu 31.8.2023

Leimu Juha, Niemelä Antti, Tuomaala Erkki, Vainio Juho

# Johdanto

---

Maailmanpolitiikan myllerrykset, ilmastonmuutos ja sen aiheuttama vihreä siirtymä ovat viime vuosina aiheuttaneet voimakkaita muutoksia energiamarkkinoihin. Vielä jokin aika sitten lähes kaikki suuret kiinteistöt varustettiin öljylämmityksellä. Tätä seurasi voimakas painotus kaukolämpöön. Pääosa kaukolämmöstä tuotetaan polttoprosesseilla. Polttoprosesseista vapautuva hiilidioksidi sekä polttoainekustannusten kohoaminen ovat ohjanneet etsimään kiinteistöjen lämmitykseen uusia vaihtoehtoja. Sähkön merkitys ja hyväksyttävyyys lämmitysratkaisujen osana on kasvanut, ja tämän vuoksi erilaisten lämpöpumppuratkaisujen käyttö on lisääntynyt merkittävästi.

Lämpöpumppu on laite, joka ottaa lämpöä matalalla lämpötilatasolla olevasta lämmönlähteestä ja työtä tekemällä, käytännössä sähköllä, nostaa sen lämmitykseen käyttökelpoiselle lämpötilatasolle. Lämmönlähteenä on erikokoisissa kiinteistöissä käytetty pitkään maa- tai kallioperän lämpöä sekä poistoilmaa. Pienissä kiinteistöissä eli lähinnä pientaloissa lämmitykseen on käytetty ulkoilmasta lämpönsä ottavia ja suoraan sisäilmaa lämmittäviä ulkoilmalämpöpumppuja. Näiden laitteiden tekniikka on pienin muutoksin samaa, kuin maailmalla yleisesti käytetyissä ilmastointilaitteissa. Jäähdyttävissä laitteistoissa lämpö otetaan tilasta ja toimitetaan ulos. Ilmalämpöpumpun kohdalla lämpö otetaan ulkoilmasta ja toimitetaan sisälle. Tekniikan ja komponenttien kehityksessä on alettu rakentaa myös sellaisia suurempia ulkoilmalämpöpumppuja, jotka luovuttavat lämpönsä rakennuksen lämmitys- ja käyttövesijärjestelmiin.

Lämpöpumpun tehokkuutta mitataan lämpökertoimella, joka on lämpöpumpun tuottaman lämpövirran ja sen tuottamiseen tarvittavan sähkötehon suhde. Tästä seuraa se, että lämpöpumpun tuottaman lämmön hinta on sähkön hinta jaettuna lämpökertoimella. Lämpöpumpun toimintaperiaatteen mukaisesti on väistämätöntä, että lämpökerroin on sitä parempi, mitä korkeampi on lämmönlähteen lämpötila. Maalämpöjärjestelmissä lämmönlähteen lämpötilan muutokset vuoden aikana ovat pieniä, kun taas ilmalämpöpumpun lämmönlähteen, ulkoilman, lämpötila on alhaisimmillaan silloin, kun lämmön-tarve rakennuksessa on suurimmillaan. Toisaalta pääosa ulkoilmalämpöpumpun tekniikasta tulee rakennuksen seinustalle yhdellä nostolla, kun taas maalämpöjärjestelmä edellyttää yleensä satojen metrien reikien poraamista kalliioon.

Rakennuksen lämmitysratkaisuja pohdittaessa maalämpöpumppu ja ilma-vesilämpöpumppu ovat vertailukelpoisia ratkaisuja. Maalämpöjärjestelmistä on runsaasti kokemuksia jo vuosikymmenten ajalta, mutta ilma-vesilämpöpumpuista on saatavana vain valmistajien antamia arvoja tietyissä käyttötilanteissa. Myös muutamia teoreettisia tutkimuksia löytyy. (3., 6., 7) Todellisesta vuosilämpökertoimesta ei kuitenkaan ole luotettavaa tietoa saatavana vielä mistään.

Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmän hankkinut asunto-osakeyhtiö Länsi-Suomessa osoitti kiinnostusta seurantatutkimuksen toteuttamiseen. Turun ammattikorkeakoulu otti haasteen vastaan, ja tavoitteeksi asetettiin yhden vuoden kestävä ehjä mittausjakso, jonka aikana tallennetaan niin paljon mittaustietoa, että laitoksen toiminta tunnetaan sen jälkeen mahdollisimman tarkasti. Rahoitukseen osallistuvat Kiinteistösäätiö, Turun ammattikorkeakoulu, Suomen kulttuurirahasto (Rakennustoimisto Ruolan rahasto) ja Rakennustuotteiden Laatu Säätiö SR.

Tutkimus toteutettiin asentamalla rakennuksen LVI-järjestelmään 43 mittalaitetta, joiden tuottamat 105 mittausarvoa tallennettiin minuutin välein palvelimelle. Dataa kertyi noin kaksi miljoonaa riviä 105 eri sarakkeeseen. Näiden perusteella voitiin määrittää laitoksen tehot, laitoksen todellinen vuosilämpökerroin, lämpöpumppujen lämpökertoimien arvot, sulatuksen vaikutus sekä lämpökertoimen riippuvuus järjestelmän toiminnasta ja lämpötiloista.

# Tutkimuksen kohdekiinteistö

---

1

Tutkimuksen kohteena oli vuonna 2018 valmistuneen 26 asunnon kerrostalon ilma-vesilämpöpumppulämmitysjärjestelmä. Kohde on rinteeseen rakennettu kolmikerroksinen asuinkerrostalo Länsi-Suomessa. Rakennuksessa on kolme asuinkerrosta alarinteen pitkällä julkisivulla (Kuva 1), joka osoittaa kaakkoon. Kadun puoleisella julkisivulla, joka osoittaa luoteeseen, kerroksista on näkyvissä vain katutason 9 pysäköintipaikkaa rakennuksen sisällä ja ylimmän kerroksen (3. krs) asunnot. Keskikerros on kadun puolella lämmittämätöntä pysäköintitilaa, lämmintä porrashuonetta ja muita yleisiä lämpimiä tiloja. Alin kerros on kadun puolelta piilossa olevaa kellaria. Alarinteen puolella kohti kaakkoa, samassa alimmassa kerroksessa on asuntoja, joiden parvekkeet on lasitettu.



**Kuva 1.**

Tutkimuksen kohde ja lämpöpumppujen sijoitus.



Rakennus on

- huoneistoalaltaan 1 440 m<sup>2</sup>
- kerrosalaltaan 2 370 m<sup>2</sup>
- lämpimien tilojen lattiapinta-ala 1 920 m<sup>2</sup>
- lämpimien tilojen tilavuus 5 500 m<sup>3</sup>

3-kerroksisessa rakennuksessa on

- yläpohjaa 920 m<sup>2</sup>
- alapohjaa 920 m<sup>2</sup>
- lämmintä lattiapinta-ala/kerros keskimäärin 640 m<sup>2</sup>
- ulkoseinää 890 m<sup>2</sup>
- ikkunoita ja ovia 210 m<sup>2</sup>

Rakennuksen huoneistoala 1440 m<sup>2</sup> jakaantuu 26 asuntoon seuraavasti:

1H+K	6 asuntoa	yht. 190 htm <sup>2</sup>	n.32 m <sup>2</sup> /asunto
2H+K	12 asuntoa	yht. 670 htm <sup>2</sup>	n.57 m <sup>2</sup> /asunto
3H+K	8 asuntoa	yht. 580 htm <sup>2</sup>	n.73 m <sup>2</sup> /asunto
yhteensä		1 440 htm <sup>2</sup>	(ka. 56 m <sup>2</sup> /asunto)

Ylimmässä kerroksessa on 14 asuntoa. Kahdessa alemmassa kerroksessa on 6 asuntoa kummassakin Rakennuksessa on keskimääräistä enemmän ala- ja yläpohjaa. Tämä johtuu siitä, että kylmää pysäköintitilaa on sijoitettu rakennuksen keskimmäiseen kerrokseen LVI-järjestelmät

Rakennuksessa on vesikiertoinen lämmitys. Asuintilat lämpiävät vesikiertoisella lattialämmityksellä, kosteat tilat mukaan lukien. Yleiset tilat lämpiävät radiaattoreilla, jotka on mitoitettu lattialämmityksen lämpötiloille. Lämmitysjärjestelmän lämpöpumppujen

kolme ulkoyksikköä on sijoitettu talon koillispäättyyn, kuvassa 1 punaisella merkittyyn kohtaan. Sijoittelu näkyy tarkemmin kuvassa 2. Kaikki kolme lämpöpumpua lämmitävät lämmitysvedettä, ja ne on kytketty samaan lämmitysvesikiertoon, mutta lämpöpumppu 1 lämmitää pääasiassa käyttövedettä ja lämpöpumput 2 ja 3 pelkästään lämmitysverkostoa. Kylmäaineesta lämpöä siirtävä lämmönvaihdin on sijoitettu ulos ulkoyksikköön, ja lämmitysvesi käy siten ulkoyksikössä lämpenemässä.



**Kuva 2.**  
Ulkoyksiköt.

Lämpöpumput on mitoitettu tyypilliseen tapaan osatehomoitokselle ja lämpöpumpputehon ylittävä lämmitystehontarve katetaan sähkövastuksilla. Käyttöveden tarvitsema lisäteho tuotetaan energiavaraajiin sijoitetuilla kahdella sähkövastuksella. Lämmitysverkostoon lisäteho tuotetaan kahden sähkökattilan vastuksilla suoraan menoveteen.

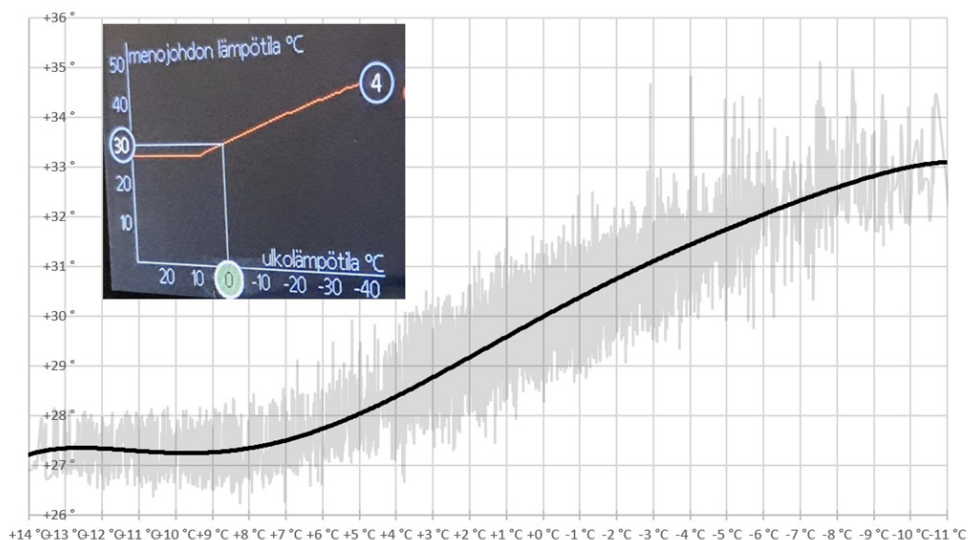
Rakennuksessa on huoneistokohtaiset ilmanvaihtokoneet lämmön talteenotolla. Ulkovaikelinevarastojen ja roskasäiliöhuoneen ilmanvaihto on toteutettu yhdellä huippuimurilla. Toinen huippuimuri huolehtii porrashuoneen, hissien ja kellarin yleistilojen ilmanvaihdosta. Kolmas huippuimuri tuulettaa radonputkistoa.

Rakennuksen sadevedet ja jätevedet pumpataan korkeammalle oleviin katuviemäriin. Käyttöveden painetta nostetaan paineenkorotuspumpulla.

## 1.1 Lämmitysjärjestelmä

Rakennuksen lämmitysjärjestelmä jakaa lämmön huoneistoihin lattialämmityksellä ja yleisiin tiloihin radiaattori- eli patteriverkostolla, jotka näkyvät kuvan 5 järjestelmäkaaviossa oikeassa reunassa kuvakkeena. Lattialämmitysputkistoihin ja pattereille menevän

veden lämpötila on sitä kuumempaa, mitä kylmempi on ulkolämpötila. Menoveden lämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta toteutetaan säätökäyrällä, jonka perusteella lämpöpumppuja ohjataan. Asetettu ja toteutunut säätökäyrä näkyvät kuvassa 3. Tämä menoveden lämpötilan säätötapa on tyypillisesti käytössä kaikissa rakennuksissa riippumatta lämmönlähteestä. Esimerkiksi kaukolämmitetyn asuinkerrostalon pattereille menevän veden lämpötilaa säädetään samoin.



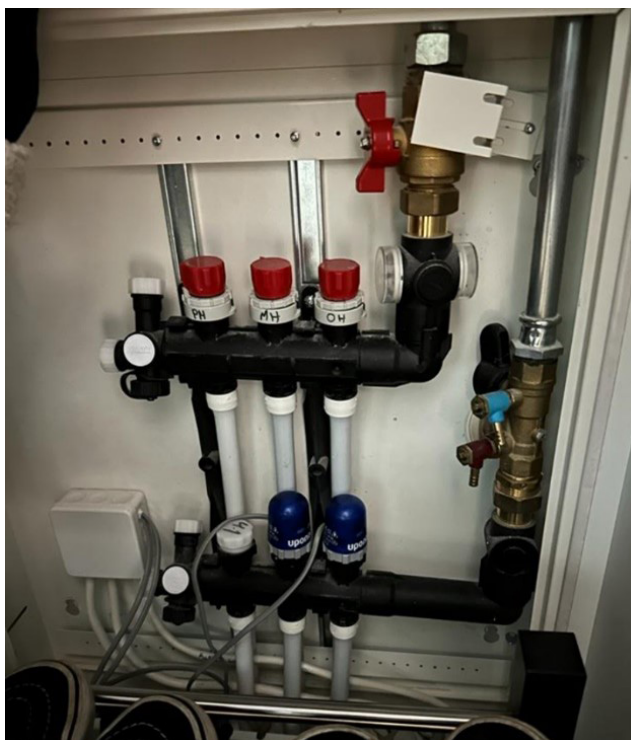
**Kuva 3.**

Asetettu säätökäyrä ja toteutunut lämpökäyrä.

Kuumeen menoveden saamiseksi lämpöpumput toimivat tyypillisesti suuremmalla teholla. Jos lämpöpumput toimivat täydellä teholla ja silti haluttua menoveden lämpötilaa ei saavuteta, kuumennetaan pattereille ja lattialämmitykseen menevää vettä vielä lisäksi sähkökattiloilla.

Jos joku tiloista lämpenee liikaa, termostaatit lämpenevissä tiloissa rajoittavat tilan lämmönlämmittimen lämmitysveden virtaamaa. Esimerkiksi jokaisessa radiaattorissa on termostaatti, joka rajoittaa ja tarvittaessa sulkee radiaattorin virtaaman, jos termostaattiin asetettu tilan tavoitelämpötila ylittyy.

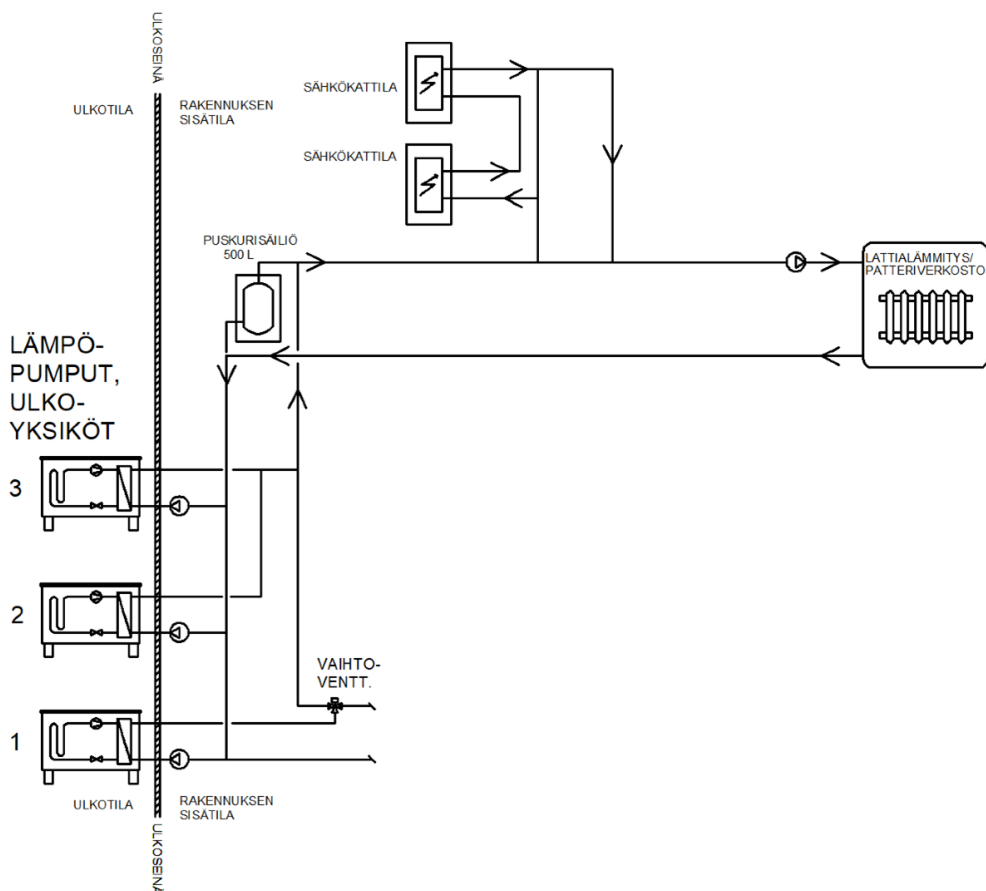
Kuvan 4 asunnon jakotukkikaapista näkyy, että makuuhuoneen ja olohuoneen lattialämmityspiirien virtaamaa rajoitetaan, jos näissä tiloissa huonelämpötila nousee tilassa olevan huonetermostaatin asetusarvoa korkeammaksi. Pesuhuoneen virtaamaa ei rajoiteta, koska pesuhuoneen laatoituksen halutaan kuivuvan nopeasti. Rakennuksen jakojohdot on tehty ohutseinäimäisellä sinkityllä teräsputkella prässiliitoksien.



**Kuva 4.**

Yhden asunnon lattialämmitysverkoston jakotukkaappi.

Lattialämmityksestä palaava lämmitysvesi lämpenee yhdessä tai useammassa lämpöpumpun ulkoyksikössä, jotka ovat kuvan 5 lämmitysjärjestelmäkaaviossa merkitty numeroilla 1, 2 ja 3.



**Kuva 5.**  
Lämmitysjärjestelmäkaavio.

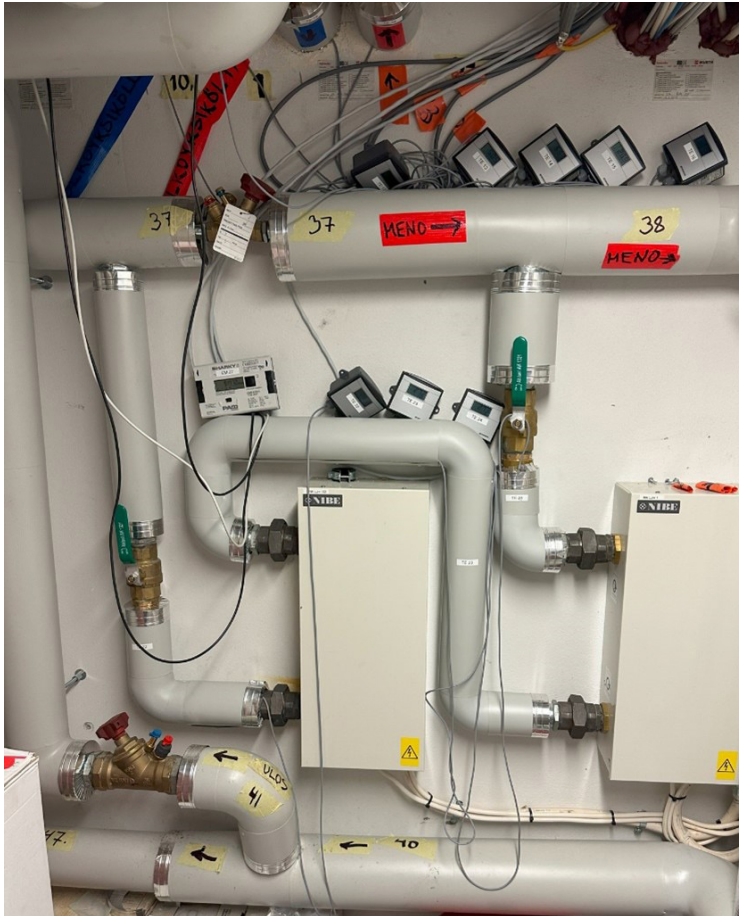
Myös ulkoyksikölle palaavan veden lämpötila muuttuu ulkolämpötilan muuttuessa. Kun tehoa tarvitaan enemmän, kompressorien nopeus kasvaa ja useampi ulkoyksikkö on käynnissä. Ulkoyksikössä olevan lämmönsiirtimen tarvitsema vesivirta säätyy tuolloin kunkin ulkoyksikön omalla pumpulla, jotka näkyvät kuvan 5 kaaviossa vasemman laidan ulkoyksiköiden oikealla puolella heti ulkoseinän vieressä. Kuvassa 6 nämä samat pumput näkyvät varaston seinällä. Ulkoyksiköt sijaitsevat samalla kohdalla seinän takana. Kuvan 5 kaaviosta samoin kuin raportin useimmista muistakin kaavioista on jätetty selkeyden vuoksi pois varusteita kuten sulkuventtiilit, yksisuuntaventtiilit, kertasäätöventtiilit, suodattimet ja varolaitteet.



**Kuva 6.**

Kolme ulkoyksiköille lämmitysvedtä kierrättävää pumppua

Ulkoyksiköissä lämmennyt vesi virtaa jälleen kohti lämmönjakoverkostoa eli kohti radiaattoreita ja lattialämmityspiirejä. Kuvassa 7 ja kuvan 5 kaavion yläosassa näkyviä sähkökattiloita tarvitaan, kun ulkoyksiköiden teho ei riitä. Näin käy esimerkiksi kovalla pakkasella. Osa lämmönjakoon ja lämmönluovutukseen virtaavasta lämmitysvedestä virtaa sähkökattiloiden kautta. Sähkökattilat kytkeytyvät päälle portaittain, jos lämpöpumpuilta tulevan veden lämpötila on poikennut lämmitysveden säätökäyrän tavoitelämpötilasta sallittua asteminuuttipoikkeamaa enemmän.



**Kuva 7.**  
Sähkökattilat lämmönjakuhuoneen takaseinällä.

Asteminuuttiluku on PID-säätimen johdannainen, jossa menoveden mitatun lämpötilan ja säätökäyrällä halutun lämpötilan erotus lisätään kumulatiiviseen summalukuun. Jos menoveden lämpötila on esimerkiksi 10 astetta säätökäyrällä asetettua 'tavoitelämpötilaa' alempi 6 minuutin ajan, sen vaikutus astepäivälukuun on -60 asteminuuttia. Lämmitystä ohjataan edullisimman lämmöntuotantotavan mukaisesti, jolloin lämpöpumpun teho käytetään ennen käyttötavoiltaan kalliimpia energiamuotoja, kuten sähkövastuksia. Tämä toteutetaan esimerkiksi asettamalla lämpöpumppu käynnistymään -60 asteminuutissa ja lisälämpö eli vastukset portaittain lämmittämään, kun asteminuutit ovat pudonneet esimerkiksi -580 asteminuuttiin. Kuvassa 8 näkyvät kohteen asteminuutti-asetukset.





**Kuva 8.**  
Asteminuuttiasetukset.

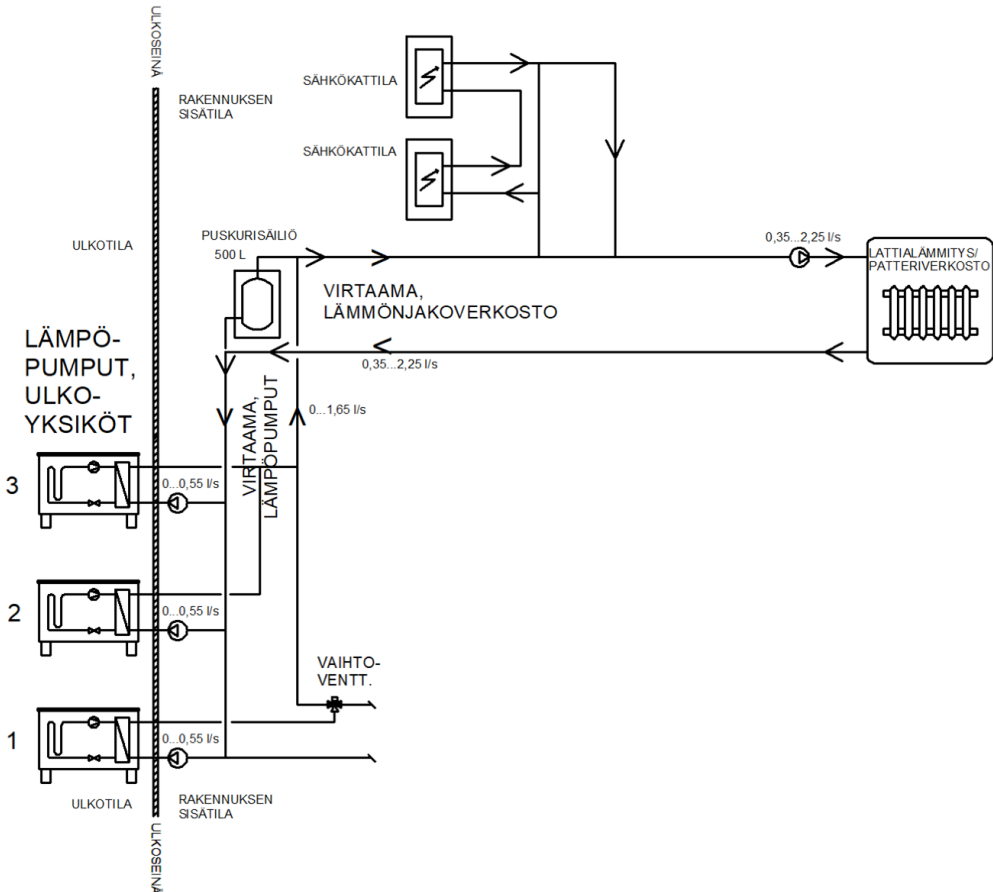
Sähkökattiloille ja lämmönjakoverkoston kohti radiaattoreita ja lattialämmityspiirejä menevä vesi ei tule vain suoraan lämpöpumpuilta. Osa vedestä tulee puskurisäiliön kautta. (Kuva 9. Puskurisäiliön sijainti näkyy myös kuvien 5 ja 10 kaavioissa.)



**Kuva 9.**  
Puskurisäiliö.



Lämpöpumppujen lauhduttimien virtaamaa ohjataan kolmella kiertovesipumpulla (kuvat 5 ja 6), parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi. Lämmönjakopiirin kautta virtaa enemmän tai vähemmän vettä riippuen huonetermostaattien ja patteritermostaattien kuristuksen määrästä. Koska virtaamat lämpöpumpuilla ja lämmönjakoverkostossa voivat olla erisuuret, tarvitaan puskurisäiliö. Puskurisäiliön läpivirtaus on lämmönjakoverkoston ja lämpöpumppujen virtaaman erotuksen suuruinen.



**Kuva 10.**

Puskurisäiliön läpivirtaamaan vaikuttavat virtaamat kaaviossa.

Ulkoyksiköiden kokonaisvirtaamaksi pitäisi summautua kulloinkin lämmityskäytössä olevien ulkoyksiköiden virtaama. Lämmönjakoverkoston kokonaisvirtaama koostuu pesuhuoneiden mukavuuslattialämmityspiireistä (mitoitus 0,35 l/s) ja asuinhuoneiden lattialämmityspiireistä sekä radiaattorivirtaamista. Lattialämmityspiirin virtaamaa säättävät huonetermostaatit ja radiaattorivirtaamaa patteritermostaatit. Kun

lämmönjakoverkoston pumppu on käynnissä ulkolämpötilan ollessa alle 24 °C, ainakin pesuhuoneiden ja saunojen lattialämmityspiireissä virtaa vettä 0,35 l/s (mitoitus). Tämä 26 asunnon jatkuva mukavuuslattialämmitysvirtaama betonilattioissa toimii tasaajasäiliön tavoin eli tasaa koko verkoston lämpötilavaihteluita, vähentää tarvetta lämmitysveden säiliöille ja mahdollistaa pidemmät seisokkijaksot osatehokäytössä sekä tilanteessa, jossa yksi lämpöpumppu tekeekin lämmintä käyttövedettä.

Lämmönjakoverkoston kiertovesipumppu on nostokorkeuden vakiopaineasetuksella 6,2 m. Vakiopaineasetuksella pyritään varmistamaan riittävä virtaama kaikille lämmönluovuttimille, kun termostaatit ovat kaikkialla auki eli jokaisen piirin ja radiaattorin kautta virtaa vähintään tasapainotuksessa kylmällä ilmalla säädetty vesivirta. Kun termostaatit rajoittavat virtaamaa, kiertovesipumppu vähentää kierrosnopeutta niin, että sama 6,2 metrin nostokorkeus pysyy. Tällöin veden kulkiessa minkä tahansa radiaattorin tai lattialämmityspiirin kautta reitillä aiheutuu yhteensä 62 kPa painehäviö, joka vastaa noin 6,2 m nostokorkeutta. Tämä lämmityspiirin pumppu on siis aina käynnissä, kun ulkolämpötila on alle 24 °C.



**Kuva 11.**

Lämmönjakopiirin kiertovesipumpun ohjauspaneeli.

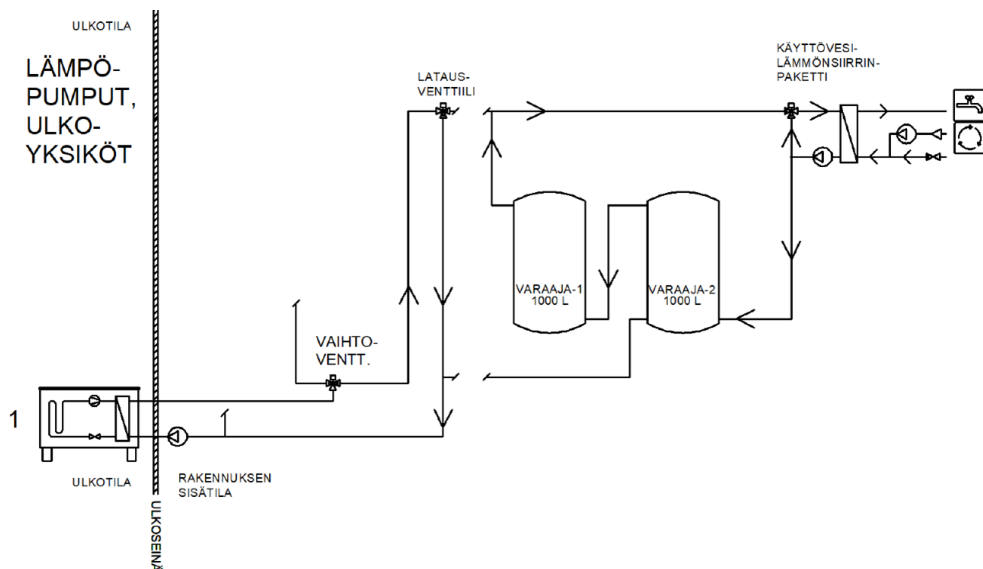
## 1.2 Lämpimän käyttöveden lämmitys

Kun järjestelmä alkaa tuottaa lämmintä käyttövettä, vaihtoventtiili (kuva 12) kääntyy. Vaihtoventtiilin kääntyessä ulkoyksiköstä tulevan lämmitysveden virtaussuunta vaihtuu ja kääntyy kohti lämpimän käyttöveden latausventtiiliä (kuvassa 13 keskellä yläosassa). Ulkoyksiköltä 1 ei mene enää tässä käyttötilanteessa lämmitysvedettä kohti lämmönjakoverkostoa tai puskurisäiliötä, vaan ulkoyksikkö 1 alkaa nyt lämmittää vain käyttöveden lämmitysvedettä.



**Kuva 12.**

Vaihtoventtiili ulkoyksiköltä tulevassa lämpöjohdossa.



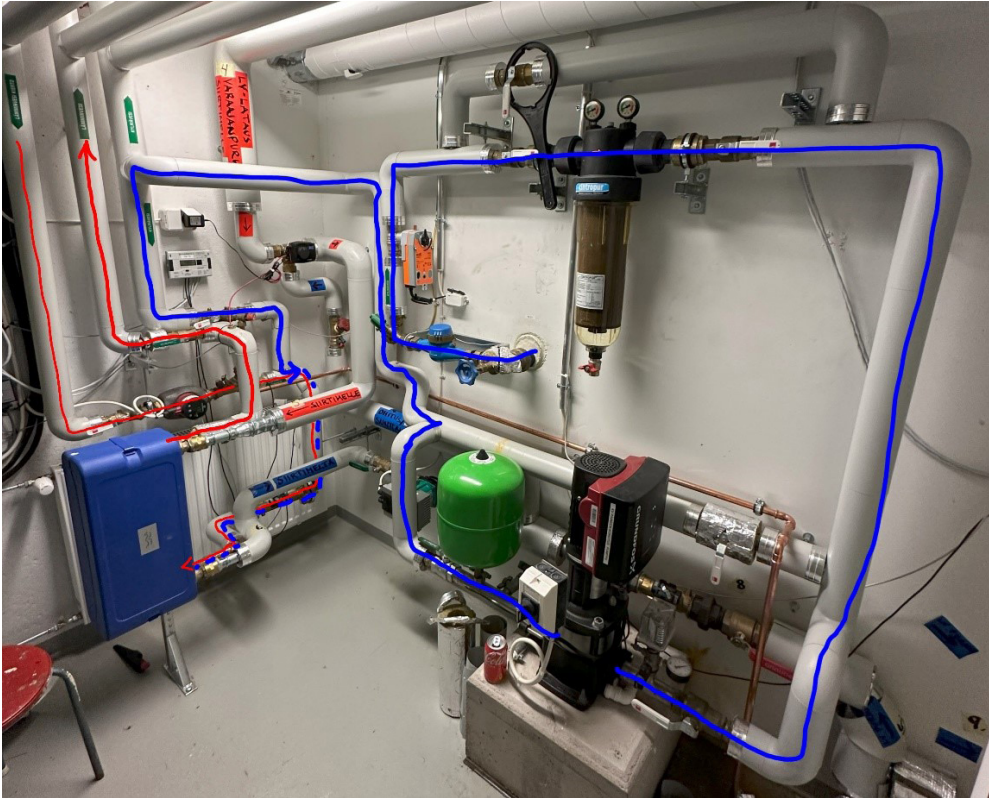
**Kuva 13.**

Lämpimän käyttöveden lämmityksen kaavio lämpöpumpun käynnistäessä käyttöveden latauksen.

Jos ulkoyksiköltä latausventtiilille menevän veden lämpötila on alle 50 °C, latausventtiili ohjaa veden takaisin ulkoyksikölle lämpenemään. Tällä kytkennällä pyritään välttämään varaajien jäädyttämistä. Lämpöpumpulta varaajille virtaa vähintään 50 °C vettä, ja latausventtiili huolehtii vain tästä.

Ulkoyksiköltä tulevan veden saavutettua 50°C lämpötilan, latausventtiili kääntyy ja ohjaa veden kohti varaajia ja siirrintä.

Kuvan 13 oikeassa yläkulmassa olevan lämmönsiirtimen oikealla puolella on lämpimän käyttöveden kierron kiertovesipumppu, joka pumppaa aina lämmintä käyttövettä (ei lämmitysvettä) kiertoon latausventtiilistä ja lämpöpumpuista riippumatta. Jatkuvalle lämpimän käyttöveden kierrolla pyritään varmistamaan kauimmaiseenkin asuntoon nopea lämpimän käyttöveden saatavuus ja pitämään lämpimän käyttöveden verkoston lämpötila korkeana erityisesti legionella-bakteerin lisääntymisen estämiseksi. Kuvan 14 punaisissa osissa on jatkuva kierto. Kun asunnossa sekoittajalta lasketaan lämmintä vettä, virtaa sinistä reittiä pitkin kylmää käyttövettä lämmönsiirtimelle lämpenemään.

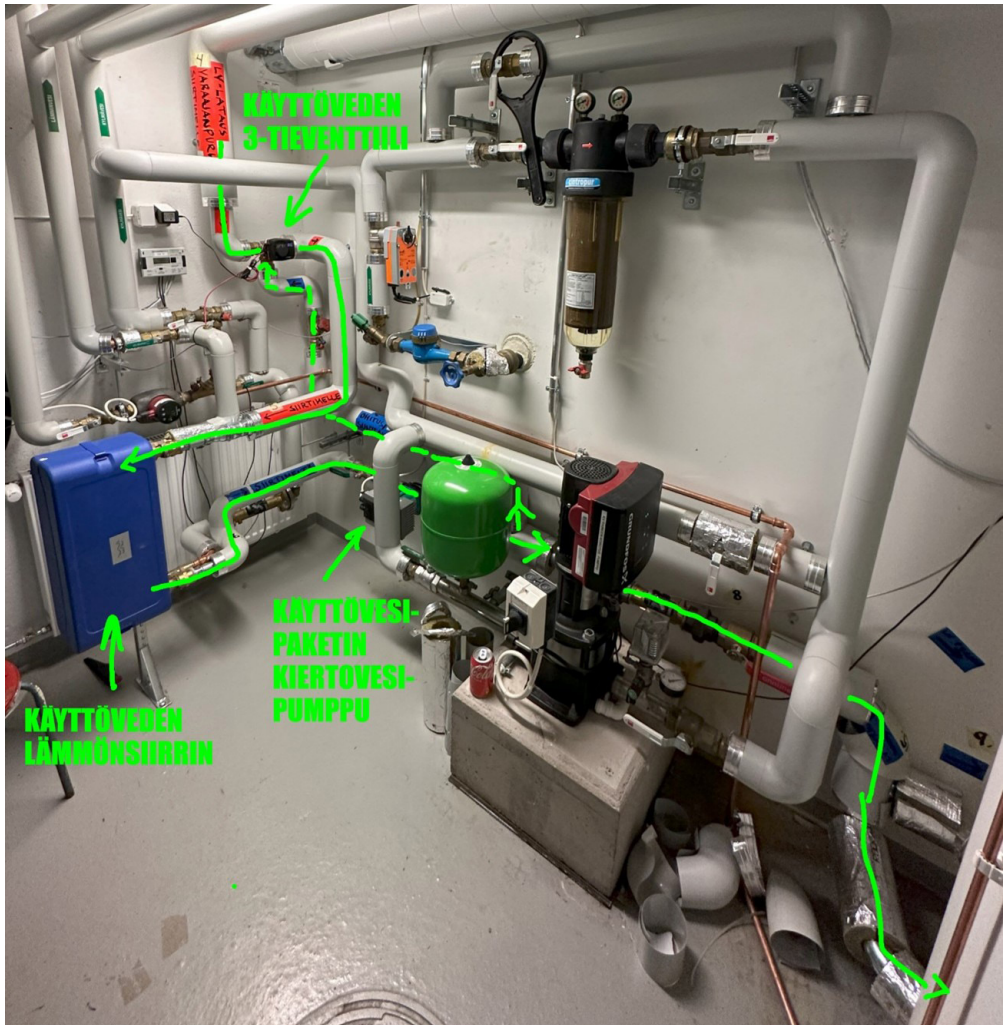


**Kuva 14.**

Lämpimän käyttöveden kierron kaavio kuvassa punaisten viivojen reittinä.

Kuvassa 13 välittömästi siirtimen vasemmalla puolella oleva kiertovesipumppu, kuuluu käyttövesisiirripakettiin, siirtimen ja kolmitiesäätöventtiilin lisäksi. Myös tämä kiertovesipumppu on aina päällä pumppaamassa lisää lämpöä siirtimelle varaajista ja lämpöpumpulta. Kun lämmintä vettä kulutetaan paljon ja hetkellisesti tarvitaan kaikki teho, virtaa lämmitysvettä enemmän energiavaraajan ja lämpöpumpun suunnasta, kuvan 15 vihreällä merkittyä reittiä.

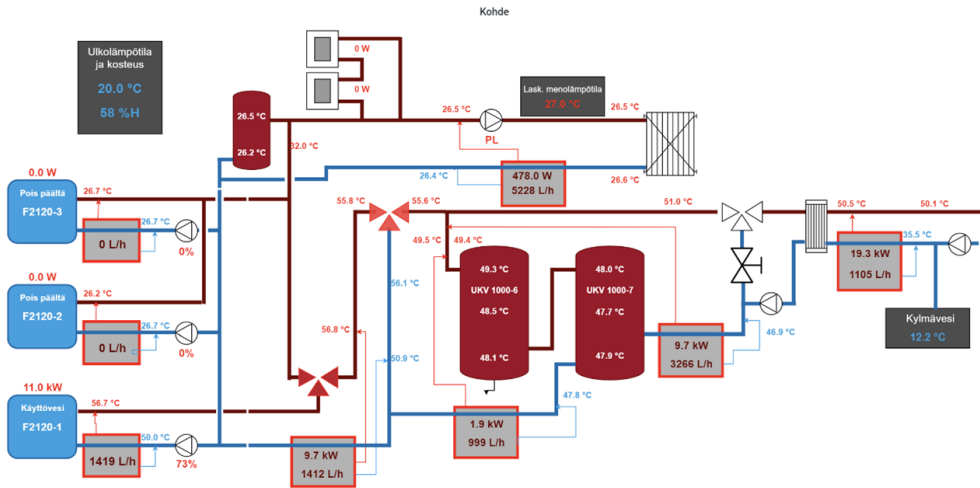




Kuva 15.

Lämmitysveden reitti lämpimän käyttöveden siirtimelle ja takaisin varaajan kautta.

Kuvan 16 järjestelmäkaavioon on merkitty vastaava lämmitysveden reitti, kun tehoa tarvitaan suihkun tai sekoittajan käyttötilanteessa. Kuvassa oikeassa laidassa oleva siirrin lämmittää lämmintä käyttövettä 19,3 kW:n teholla pelkän käyttöveden kierron noin 2 kW:n sijasta, ja lämpöpumppu tarjoaa hetkellisen tehon 11 kW. Osa siirtimelle menevästä käyttövedestä lämmittävästä vedestä tulee siis lämpöpumpulta 1 ja osa lämpövarastona suurta kulutusta varten toimivilta varaajilta.



**Kuva 16.**

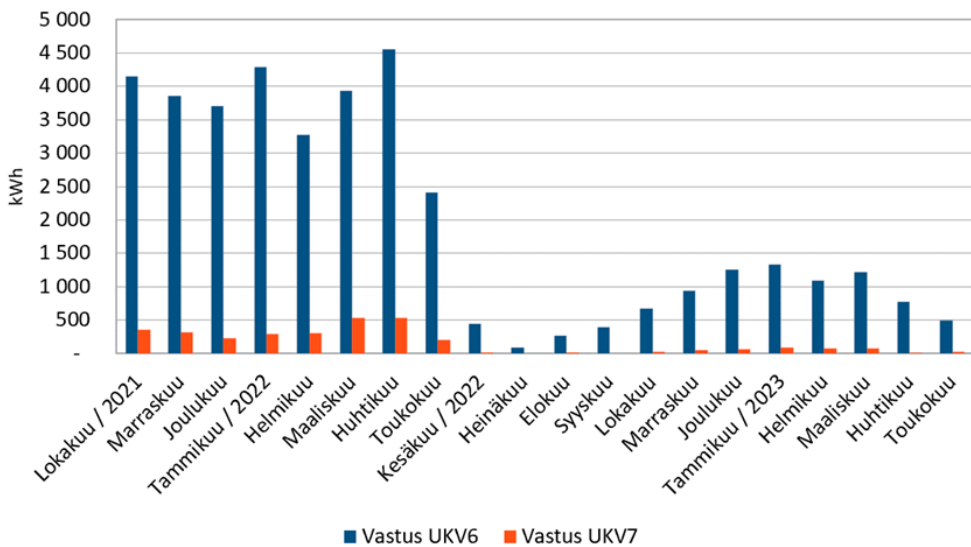
Lämmitysveden reitti lämpimän käyttöveden siirtimelle.

Kun lämmönsiirtimen kaikkea tehoa ei tarvita, esimerkiksi öisin, suurempi osa siirtimellä kiertävästä lämmitysvedestä kulkee kuvan 15 vihreällä katkoviivoitetun reitin kautta ja vain pieni osa yhtenäisen viivan reittiä varaajan alaosan kautta. Siirtimeltä asuntoihin lähtevän lämpimän veden lämpötilaa ja siirtimen tehoa säättää kuviin merkitty käyttöveden 3-tiesäätöventtiili. Se muuttaa siirtimelle tulevan kuumen veden ja siirtimelle palaavan jäähtyneen veden suhdetta. (Kuvassa 15 varaajilta tuleva vesi näkyy ylhäältä saapuvana yhtenäisenä viivana ja jäähtynyt vesi katkoviivana.)

### 1.3 Järjestelmään ennen vuoden mittausjaksoa tehdyt muutokset

Ennen varsinaista vuoden mittausjaksoa, mittareiden asennusten jälkeen ensimmäisenä talvena 2021–2022, heräsi epäily, ettei vesijärjestelmä toimi tarkoitetulla tavalla. Huomiota herätti havainto sähkövastusten korkeista käyttöajoista, vaikka lämpöpumppujen

kapasiteettia olisi ollut vapaana. Selvitystyön tuloksena havaittiin yhden kolmitieventtiilin asennusvirheestä johtuva virheellinen toiminta. Venttiilin asentovirhe oli sikäli peitollinen, että osan ajasta venttiili toimi oikein, mutta kääntyessään venttiili sekoitti vesijärjestelmän estämällä suurimman osan käyttövedestä virtaamaan oikeaan paikkaan. Sen seurauksena vastukset olivat päällä suurelta osin. Järjestelmässä havaittu poikkeama korjattiin toukokuussa 2022. Korjauksen vaikutus näkyy selvästi kuvan 17 pylväsdiagrammissa, joka kuvaa varaajien vastusten UKV 6 ja UKV 7 käyttöä. Vastusten käytön voidaan sanoa romahtaneen tehdyn korjauksen jälkeen ja järjestelmän toimineen lähes suunnitellulla tavalla loput mittausjaksosta.



**Kuva 17.**

Varaajien vastusten käyttö ennen ja jälkeen 5/2022 tehdyn korjaustyön.

Tutkimuksesta jätettiin pois venttiilin korjausta edeltäneet tulokset. Tulokset ja johtopäätökset koskevat siis suunnitellulla tavalla toimivaa laitosta eli kuvan 17 aikajanan keskikohdan 6/2022 jälkeistä vuoden mittausjaksoa.



# Lämpöpumppu

---

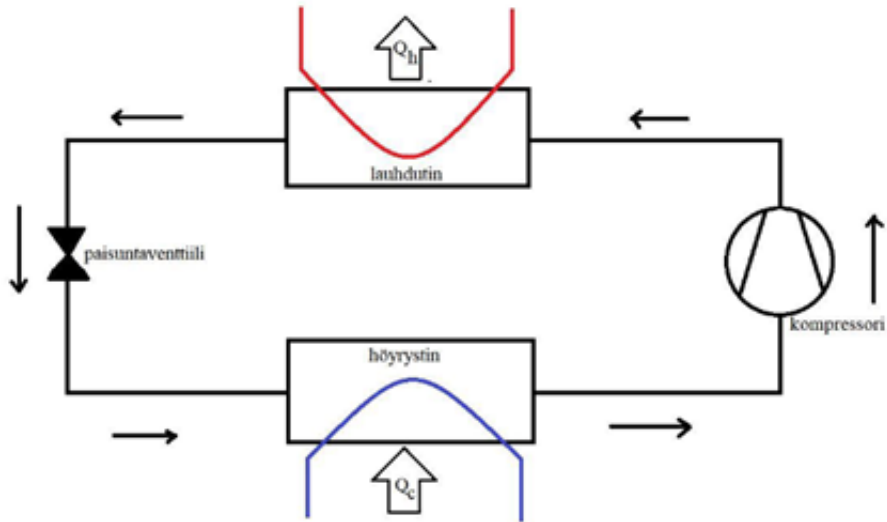


2

Laitoksen pääasiallisena lämmityslaitteena toimivat lämpöpumput. Lämpöpumppu on laite, joka ottaa lämpöenergiaa alhaisessa lämpötilassa olevasta lämmönlähteestä ja nostaa lämpöenergian lämpötilan käyttökelpoiselle tasolle työtä tekemällä. Työn tekee yleensä sähkömoottorin pyörittämä kompressori. Kiinteistöjen lämmityksessä voidaan lämmönlähteenä käyttää esimerkiksi peruskalliota, maata, vettä vesistöissä tai ulkoilmaa. Lämmönlähde on usein tyypillisesti lämpötilatasolla  $-10 - +10^{\circ}$ . Kompressorin kylmäaineeseen tekemän työn ja lämpöpumppuprosessin avulla saadaan lämpötila nostettua kiinteistön lämmitysjärjestelmissä käyttökelpoiselle tasolle  $+40 - +60^{\circ}$ . Nyt tutkimuksen kohteena olevassa kiinteistössä lämmönlähteenä on ulkoilma ja lämpöenergia syötetään kiinteistön lämmitys- ja käyttövesijärjestelmiin.

## 2.1 Lämpöpumppuprosessi

Lämpöpumppuun on valittu sopiva kylmäaine, joka painetta säätämällä saadaan kiehuun höyrystimessä muutamia asteita lämmön lähdeä alhaisemmassa lämpötilassa. Kylmäaine johdetaan höyrystimeen matalapaineisena nesteinä, joka kiehuu kaasun olomuotoon vakiopaineessa ja vakiolämpötilassa. Lämmönlähteen lämmöllä kylmäaineen olomuoto on saatu muuttumaan kylmästä nesteestä matalapaineiseksi kylmäksi kaasuksi. Kylmä kaasu johdetaan kompressoriin, missä voimakkaan puristuksen seurauksena kaasun lämpötila kohoaa merkittävästi. Kuumakaasu luovuttaa lauhduttimessa lämpönsä lämmitettävään kohteeseen. Kuumakaasun jäähtyminen edustaa vain hyvin pientä osaa kokonaislämpövirrasta, ja ylivoimaisesti suurin osa lämmöstä siirtyy, kun kylmä kaasu lauhtuu vakiopaineessa ja vakiolämpötilassa nesteen olomuotoon. Lämmin korkeapaineinen neste vie lämpöä paisuntaventtiilille. Paisuntaventtiili annostelee höyrystimelle sellaisen määrän kylmäainetta, jonka se pystyy höyrystämään. Paisuntaventtiilissä paine ja lämpötila laskevat höyrystimessä vallitsevalle tasolle.



**Kuva 18.**

Pelkistetty lämpöpumppprosessi.

Lämpöpumppprosessi on termodynamiikan näkökulmasta vastapäivään pyörivä Carnot-kiertoprosessi. Carnot-prosessi on ideaaliprosessi, mihin ei käytännössä milloinkaan päästä, mutta Carnot-prosessia tarkastelemalla saadaan selville mahdollisuuksien rajat sekä lämpötilojen vaikutus lämpöpumpun suorituskykyyn. Lämpöpumpun suorituskykyä mitataan lämpökertoimella, joka on tuotetun lämpömäärän ja siihen tarvittavan sähkötehon suhde. Tästä käytetään kansainvälisesti merkintää COP. Lämpökertoimen teoreettinen maksimiarvo voidaan määrittää Carnot-prosessin avulla prosessin absoluuttisista lämpötiloista.  $T_L$  (lauhtumislämpötila) on se lämpötila, jossa lämpöpumppu luovuttaa lämpönsä ja  $T_H$  (höyrystymislämpötila) on se lämpötila, jossa lämpö tuodaan lämpöpumppuun. Molemmat lämpötilat ovat Kelvin-asteina. Esimerkiksi lämpöpumppu, johon lämpö tuodaan  $-10\text{ °C}$  lämpötilassa,  $T_H$  on  $263\text{ K}$ . Lämpöpumppu luovuttaa lämmön  $50\text{ °C}$  lämpötilassa, jolloin  $T_L$  on siis  $323\text{ K}$ . Teoreettinen maksimilämpökerroin voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$COP = \frac{T_L}{T_L - T_H}$$

Näillä arvoilla lämpöpumpun teoreettinen maksimilämpökerroin on 5,4. Käytännössä laitteistoissa on aina erilaisia häviöitä ja todellinen lämpökerroin jää selvästi alemmaksi. Kaava osoittaa kuitenkin selvästi, että mitä suurempi on lämpötilaero  $T_L - T_H$ , sitä pienempi on lämpökerroin. Yleensä lämpötila  $T_H$  määräytyy käytettävissä olevasta lämmön lähteestä ja ainoastaan lämpötilaan  $T_L$  voidaan vaikuttaa. Tästä seuraa, että lämpökerroin on sitä korkeampi, mitä matalampaa lämpötilaa  $T_L$  voidaan käyttää. Tätä kuvataan

usein pumppuvertauksella. Jos pumpun teho on vakio, mitä korkeammalle vettä pumpataan, sitä pienempi vesivirta sinne saadaan. Toisin sanoen mitä korkeammalle lämpöpumpussa lämpötilaa nostetaan, sitä pienempi lämpövirta saadaan samalla sähköteholla.

## 2.2 Kohteen NIBE-lämpöpumput

Tutkimuskohteessa on kolme NIBE F2120-20 -laitteistoa nimellislämpöteholtaan 13/14 kW/yksikkö menolämpötiloilla 35/55 °C. Laitteiden tekniikka on sijoitettu ulkoyksiköihin rakennuksen ulkopuolelle aidattuun tilaan. Kompessorit ovat hermeettisiä scroll-kompressoreita, joiden pyörimisnopeutta säädetään inverttereillä. Valmistajan julkaisemien tehokäyrien ja mittaustulosten perusteella laitteiston automatiikka rajoittaa voimakkaasti laitteiston tehoa, kun ulkolämpötila ylittää 0 °C. Tämä tapahtuu rajoittamalla kompressorin pyörimisnopeutta. Höyrystimenä toimii tavallinen kupari-alumiini -lamelipatteri. Lauhdutin on levylämmönsiirrin, jossa kiertää lämmitysjärjestelmän vesi. Ilman virtaus höyrystinpatterin läpi saadaan aikaan aksiaalipuhaltimella.

Valmistajan ilmoittamat suoritusarvot taulukkomuodossa. (Taulukko 1.)

### Taulukko 1.

Lämpöpumpun valmistajan ilmoittamat vuosilämpökertoimet. Kohteessa malli 20.

SCOP & Pdesign F2120 katso EN 14825								
F2120	8		12		16		20	
	Pdesign	SCOP	Pdesign	SCOP	Pdesign	SCOP	Pdesign	SCOP
SCOP 35 Väli-ilmast (Eurooppa)	5,9	4,80	8	4,83	11	5,05	11	5,05
SCOP 55 Väli-ilmast (Eurooppa)	6,3	3,75	8,3	3,78	12,3	3,9	12,3	3,9
SCOP 35 Kylmä ilmasto	6,8	4,03	9,3	4,05	13	4,25	13	4,25
SCOP 55 Kylmä ilmasto	7,4	3,33	9,8	3,33	14	3,53	14	3,53
SCOP 35 Lämminilmasto	5,9	5,43	9,2	5,48	13	5,5	13	5,5
SCOP 55 Lämminilmasto	6,3	4,35	9,2	4,48	13	4,5	13	4,5

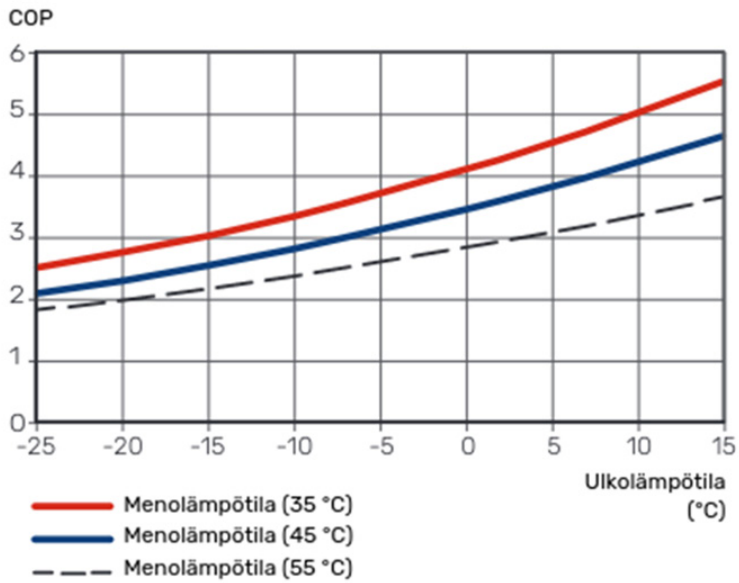
<sup>1)</sup> Tehotiedot ml. sulatukset EN 14511:n mukaan lämmitysvesivirralla, joka vastaa DT=5 K kun 7 / 45.

<sup>2)</sup> Nimellvirta vastaa DT=10 K kun 7 / 45.

Taulukko 1. jatkuu

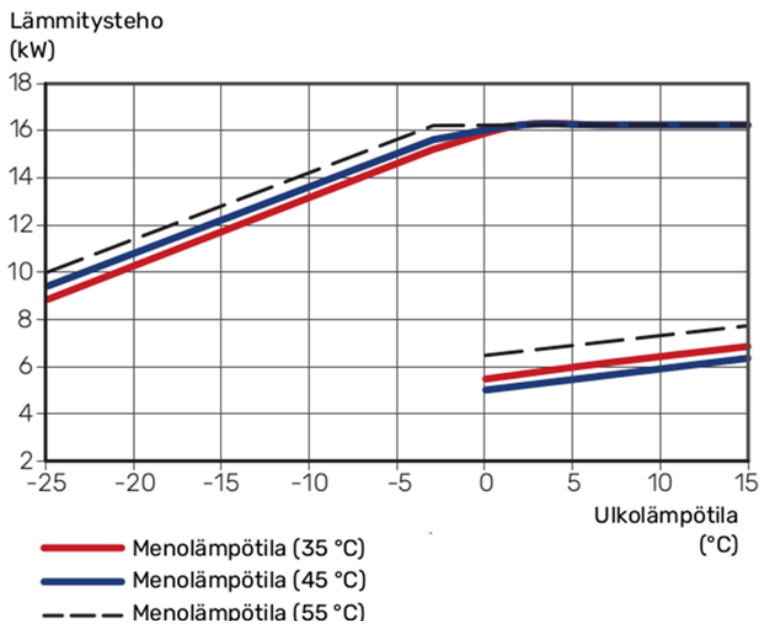
Taulukko 1. jatkuu

F2 120 – 3x400V		8	12	16	20
<b>Lämmitys</b>					
<b>Tehotiedot kun EN 14511, osakuoma<sup>1)</sup></b>					
7/35 Antoteho / Ottoteho / COP <sub>EN14511</sub>	kW/kW/-	4,77/0,99/4,82	3,54/0,69/5,12	5,17/1,01/5,11	5,17/1,01/5,11
7/45 Antoteho / Ottoteho / COP <sub>EN14511</sub>	kW/kW/-	4,82/1,24/3,89	3,64/0,91/4,00	5,49/1,33/4,14	5,49/1,33/4,14
2/35 Antoteho / Ottoteho / COP <sub>EN14511</sub>	kW/kW/-	4,03/0,91/4,43	5,21/1,22/4,27	7,80/1,79/4,36	9,95/2,36/4,22
2/45 Antoteho / Ottoteho / COP <sub>EN14511</sub>	kW/kW/-	4,07/1,16/3,51	5,27/1,49/3,54	7,97/2,24/3,56	10,41/2,88/3,61
<b>Jäähdytys</b>					
	Ulkolämpötila/menolämpötila	Maks.	Maks.	Maks.	Maks.
<b>Tehotiedot kun EN14511 ΔT5K</b>					
	35 / 7 °C	3,80/1,28/2,97	4,69/1,70/2,76	7,09/2,72/2,61	8,10/3,50/2,31
Antoteho/ottoteho/EER	35 / 18 °C	5,10/1,37/3,73	5,44/1,73/3,15	8,19/2,83/2,90	9,26/3,64/2,54
<b>Sähkötiedot</b>					
Nimellisjännite		400V 3N-50Hz			
Maks. käyttövirta, lämpöpumppu	A <sub>rms</sub>	6	7	9,5	11
Maks. käyttövirta, kompressori	A <sub>rms</sub>	5	6	8,5	10
Maksimiteho, puhallin	W	40	45	68	80
Varoke	A <sub>rms</sub>	10	10	10	13
<b>Kylmäainepiiri</b>					
Kylmäaineen tyyppi		R410A			
Kompressorin tyyppi		Scroll			
Täytösmäärä	kg	2,4	2,6	3	3
CO <sub>2</sub> -ekvivalentti	t	5,01	5,43	6,26	6,26
Katkaisu-arvo, ylipaineensäädin (BP1)	MPa	4,5			
Ero, ylipaineensäädin	MPa	0,7			
Katkaisu-arvo, alipaineensäädin	MPa	0,12			
Ero, alipaineensäädin	MPa	0,7			
<b>Ilmavirta</b>					
Maksimi-ilmavirta	m <sup>3</sup> /h	2 400	3 400	4 150	4 500
Min./Maks. ilman lämpötila, maks.	°C	-25 / 43			
Sulatusjärjestelmä		käänteinen jakso			
<b>Vesivirta</b>					
Suurin järjestelmäpaine, lämmitysvesi	MPa	0,45 (4,5 bar)			
Min/maks. ilmavirta	l/s	0,08/0,32	0,11/0,44	0,15/0,60	0,19/0,75
Min virtaus sulatus (100 % pumpun nopeus)	l/s	0,27	0,35	0,38	0,48
Maks./min. lämmitysveden lämpötila, jatkuva käyttö	°C	65 / 26			
Lämmitysveden liitäntä F2120		G1 1/4" ulkokierre (Ø35 mm)			
Liitäntä, lämmitysveden joustoletku		G1 1/4" ulkokierre (Ø35 mm)			
<b>Mitat ja painot</b>					
Leveys	mm	1 130	1 280		
Syvyys	mm	610	612		
Korkeus ml. säätöjalat	mm	1 070	1 165		
Paino (ilman pakkausta)	kg	167	177	183	



**Kuva 19.**

Lämpöpumpun valmistajan ilmoittama lämpökerroin ulkoilman lämpötilan funktiona.



**Kuva 20.**

Lämpöpumpun valmistajan ilmoittama lämmitysteho ulkolämpötilan funktiona.

## 2.3 Sulatuksen tarve

Laitteisto on tyypiltään suorahöyrysteinen. Se tarkoittaa sitä, että höyrystyvä kylmäaine virtaa kupariputkessa, jonka ulkopuolisten alumiinilamellien välissä virtaa ulkoilmaa. Koska lämmönsiirto tapahtuu kiehuvaan kylmäaineeseen, pysyy kylmäaineen ja näin myös lamellien pintalämpötila lähes vakiona koko patterin alalla. Höyrystymislämpötila on usein noin 8 celsiusastetta ulkoilman lämpötilaa alhaisempi. Jos ulkoilman lämpötila on esimerkiksi 0 °C, tämä ilma kohtaa kohtaa siis kauttaaltaan -8 °C:n lämpötilassa olevan lämmönsiirtopinnan. Ilmassa oleva kosteus tiivistyy ja jäätyy lämmönsiirtopinnalle, mikä lisää aluksi painehäviötä ja pienentää ilmavirtaa. Tällöin lämmönsiirto heikkenee romahduttaen laitteiston suorituskyvyn. Tämä voidaan välttää säännöllisesti tapahtuvien sulatusjaksojen avulla. Tähän tarkoitukseen lämpöpumppu on varustettu 4-tieventtiilillä, joka kääntää kylmäaineen virtaussuunnan siten, että kompressorin kuumakaasu ohjataan sulattamaan jäätynyttä höyrystinpatteria. Sulatusjakson jälkeen laitteisto toimii jälleen normaalisti.

Sulatustoiminnon ohjaus tapahtuu ulkolämpötilan ja höyrystymislämpötilan välisen lämpötilaeron perusteella, mutta siitä valmistaja ei ole antanut tarkempia tietoja.

Sulatuksen vaikutusta laitoksen energiatalouteen eri olosuhteissa on tarkasteltu tarkemmin luvussa 4.3 Sulatus.

# Järjestelmän instrumentointi

---

3

Kiinteistöautomaatiojärjestelmät sisältävät usein melko kattavaakin instrumentointia, mutta näiden laitteiden keräämät tiedot ovat ainoastaan järjestelmän säätimen omassa käytössä, eikä niitä tallenneta pitkältä ajalta. Lisäksi tällaisen mittadatan tarkkuutta on vaikea todentaa. Monipuolisesti tietoa keräävät sekä tarkat laitteet ovat usein kalliita ja vaikeita toteuttaa, minkä vuoksi niitä harvoin asennetaan asuintaloihin. Projektin tiedonkeruuta varten piti siis rakentaa oma järjestelmänsä, jolla tarvittavat tiedot saatiin luotettavasti kerättyä talteen mittausjaksolta. (13.)

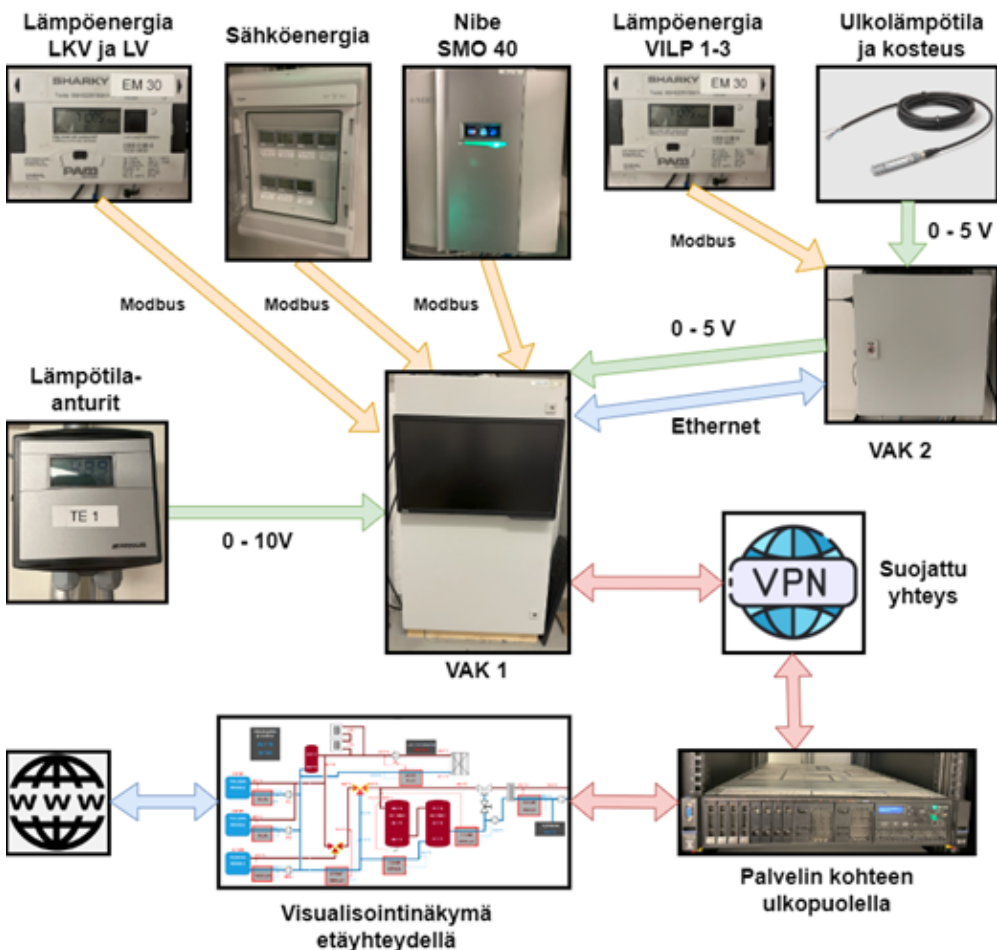
Tässä kappaleessa käydään läpi mittausjärjestelmän mitattavat arvot ja mittausjärjestelmän toteutus. Järjestelmän tuottaman datan tulee olla luotettavaa ja helposti saavutettavissa projektin henkilöstölle. Jouduimme sulkemaan pois ilma-vesilämpöpumppujen oman tiedonkeruujärjestelmän hyödyntämisen mittauksissa, sillä emme pystyneet varmentamaan sen tuottamaa mittadataa kohtuullisella vaivalla.

Instrumentointi kattaa kaikki anturit ja mittalaitteet, jotka keräävät dataa kohteen järjestelmien toiminnasta. Tarpeena on mitata lämpötiloja järjestelmän eri osissa sekä järjestelmän osien ja laitteiden energiankulutusta ja tuotetun energian määrää. Toteutettu mittausjärjestelmä mittaa ja tallentaa jokaisen ilmoitetun mittapisteen kerran minuutissa ja lisää tallenteeseen aikaleiman. Jotta saatava tieto päivittyisi riittävän usein, mittarit on asetettu päivittämään tietonsa puolen minuutin välein.

Mitattavaksi valittiin kohteen UKV-varaajien lämpötilat kaikista anturitaskuista, yhteensä 8 kpl, sekä putkessa virtaavan nesteen lämpötilat yhteensä 33 eri kohdasta. Lämpöenergian osalta mitattiin jokainen ulkoyksikkö erikseen, lämmitykseen ja käyttöveteen

siirtynyt energia, sekä lämpöpumpun 1 tuottamasta energiasta käyttöveden osuus. Sähköenergia mitattiin jokaiselta ulkoyksiköltä erikseen sekä varaajissa olevilta vastuksilta ja lämmityksen apuna toimivilta sähkökattiloilta.

Järjestelmästä sähkö- ja lämpöenergiamittarien sekä lämmitysjärjestelmän oman keskusyksikön mittadata siirtyvät väyläliikenteenä Modbus-väylässä ja lämpötilamittaukset 0–10 V analogiviestinä. Paikallinen keskusyksikkö vastaanottaa nämä tiedot, käsittelee ne ja tallettaa ne tietokantaan, josta ne ovat helposti saavutettavissa myöhemmin. (Kuva 21)



Kuva 21.  
Laitoksen instrumentointi.



Järjestelmä on pääosin koottu väyläviesteistä. Väyliä mittaukselle valittiin neljä, jotta datankeräys olisi mahdollisimman luotettavaa ja väyläkuormitus pientä ja jotta mahdollisten häiriöiden aikana kokonaisuus ei kaatuisi. Väylien nopeuksissa on eroja komennon saavuttaessa laitteen ja laitteen vastatessa. Viive olisi muodostunut ongelmaksi yhdessä jaetussa kokonaisväylässä, sillä kysytyjen arvojen kokonaismäärä ei olisi ehtinyt toteutua minuutin aikasyklissä.

Valituissa sähkö- ja vesienenergiamittareissa on kumulatiivinen laskenta, jolloin mahdolliset katkokset mittauksessa eivät vaikuta kokonaisenergiaan. Sähköenergiamittarien Modbus-väylästä tallennettavia rekisteritietoja ovat hetkellinen teho ja kumulatiivinen energia. Lisäksi lämpöenergiamittauksissa valittuja rekistereitä ovat virtaus, lämpötilat meno- ja paluuedelle, mittarin laskema teho ja kumulatiivinen energia.

### **3.1 Mittausjärjestelmän laatuvaatimukset**

Mittausten osalta peruslähtökohtana on tuottaa tarkkaa ja luotettavaa tutkimusdataa, joka on varmistettu usealta osin. Mittausjärjestelmän anturit on varmennettu useilla eri ulkopuolisilla kalibroiduilla mittareilla, jolloin anturien antamat arvot ovat tarkkoja ja linjassa. Datan toistettavuus on todennettu seuraamalla datassa tapahtuvia ilmiöitä. Ilmiöt toistuvat samankokoisina ja vastaavat antureita. Datan resoluution on todettu olevan riittävän suuri, jolloin kokoluokka pysyy esimerkiksi pienissä virtaamissa toistettavana.

Datan aikaresoluutio ja mittaustarkkuus ovat riittävällä tasolla, kun ilmiöt pystytään todentamaan koko järjestelmän osalta samanaikaisesti. Resoluution ollessa yksi tärkeimmistä raportin osista, kokonaisuus varmistetaan peräkkäisillä mittareilla ja erillisillä tarkistusmittauksilla. Mittaukset on validoitu eri tilanteilla, kuten esimerkiksi kääntämällä hetkellisesti käsiventtiilejä ja seuraamalla järjestelmän luomia tilanteita laitoksessa itsessään. Kokonaisuudessaan data on riittoisaa, järjesteltyä, dokumentoitua ja erinomainen pohja analyysille.

### **3.2 Järjestelmän ohjelmistototeutus**

Ohjelmisto on tärkeä osa mittausjärjestelmää, sillä se muuntaa mitatun datan käyttökelpoiseksi materiaaliksi erilaisia analyyseja varten. Ohjelmisto pyörii kohteessa olevalla tietokoneella, joka on kytketty tietoturvallisen etäyhteyden kautta etänä sijaitsevalle palvelimelle. Ohjelmisto on toteutettu itse, ja se hoitaa datan keräämisen mittalaitteilta, mahdolliset tarvittavat skaalaukset, sekä tiedon lähettämisen eteenpäin SQL-tietokantaan. Ohjelmiston toteutuksella on erilaisia vaatimuksia, jotta sen tuottamaa dataa voidaan pitää käyttökelpoisena.

Mittausjärjestelmän ohjelmisto on ohjelmoitu järjestelmän mittausten vaatimusten täyttämiseksi. Järjestelmän sisältämät väylä- ja analogiaviestit on saatava datan laatuvaatimusten osalta täytettyä seuraavasti:

- Aikakriittisyys. Ajallinen hajonta on rajattu minuuttiin. Satunnainen vaihtelu mittausajoissa voi tuottaa korkeintaan 30 sekuntia poikkeavaa dataa. Mittaussuureiden hitaudet eivät aiheuta mittauksissa kriittistä vaihtelua.
- Väyläkriittisyys. Väylien sisältämän datan määrä ja hitaus on huomioitu ohjelmistossa. Datan kyselyt tapahtuvat hallitusti tasasyklein, jolloin väylällä ei tapahdu päällekkäistä datakyselyä tai viivettä.
- Tietokantaliitettävyyden. Datan määrä on saatava käsiteltyä siten, että tietokantaan lähetettävä paketti on optimoitu ja tietokantamuodossa. Ohjelmisto tallentaa mittadatan paikalliseen tietokantaan.

Ohjelmiston rakenne on jaettu siten, että jokainen väylä ja analogiakortti kysytään omassa ohjelman osassaan erikseen, jolloin samaa sovitinta ei täytetä samanaikaisilla kyselyillä. Data tuotetaan tallennettavaksi muistiin aikaleiman kanssa. Muistia siivotaan siten, että tietokantaan lähetetyt datat poistetaan tiedonkeruuohjelmistosta lähetyksen jälkeen. Replikointi, eli mittadatan kopiointi paikasta toiseen, on tehty tiedon syöttämiseksi paikallisesta tietokannasta verkkopalvelimella sijaitsevaan tietokantaan, ja tämä VPN-verkkoa pitkin liikkuva tieto salataan siirron ajaksi. Replikointi myös poistaa mahdolliset verkkoon liittyvät katkokset, joita on ilmennyt mittausjakson aikana satunnaisesti. Verkkopalvelimelle asennettua visualisointiohjelmistoa voidaan käyttää tietokantaan talletetun mittadatan analysointiin. Tiedon analysointi on tehtävissä serveriltä tai ongelmatapauksissa myös paikallisesti.

### 3.3 Valittu instrumentointi

Kohteen instrumentointiin valittiin alla listatut laitteet. Lämpötila-antureiksi valittiin vertailun perusteella Proidualin laitteet. Putken pinnalta tapahtuva lämpötilan mittaus herätti epäilyksiä, mutta kontrollimittauksissa ei pystytty osoittamaan menetelmästä aiheutuvaa virhettä.

- Modbus-laitepalvelimena 1 kpl Moxa Nport 5150 ja 2 kpl Moxa Nport 5232
- Varaajien lämpötilamittaukseen 8kpl Proidual TEKY4-LU, tarkkuus +/- 0,5 °C
- Putkistojen lämpötilamittaukseen 17 kpl Proidual TEPK-LU, tarkkuus +/- 0,5 °C
- Lämpöenergian mittaukseen 8 kpl (SM) Saint-Gobain Sharky 775, maksimivirhe +/- 1 %, kun virtaus vähintään 10 % nimellisvirtauksesta (4.)
- Sähköenergian mittaukseen 8 kpl (EM) Gavazzi EM330 50/5 A virtamuuntajilla, tarkkuus +/- 1 %

Laitokseen asennetut mittalaitteet

- Energiamittari EM29 VILP 1
- Energiamittari EM30 VILP 2
- Energiamittari EM28 VILP 3
- Sähköenergian mittaus SM11 ELK 26\_102 sähkökattila
- Sähköenergian mittaus SM12 ELK 26\_1 sähkökattila
- Sähköenergian mittaus SM13 varaaja 1 UKV 6
- Sähköenergian mittaus SM14 varaaja 2 UKV 7
- Sähköenergian mittaus SM16 VILP 1
- Sähköenergian mittaus SM15 VILP 2
- Sähköenergian mittaus SM17 VILP 3
- Sähköenergian mittaus SM18 LTO
- Energiamittari EM198 lattialämmitys
- Energiamittari EM79 käyttövesi
- Varaajien lämpötila-anturit A1-A8
- Putkistojen lämpötila-anturit A9-A25
- Modbus-yhteys ja 20 arvon luenta Nibe SMO 40-ohjausyksiköstä

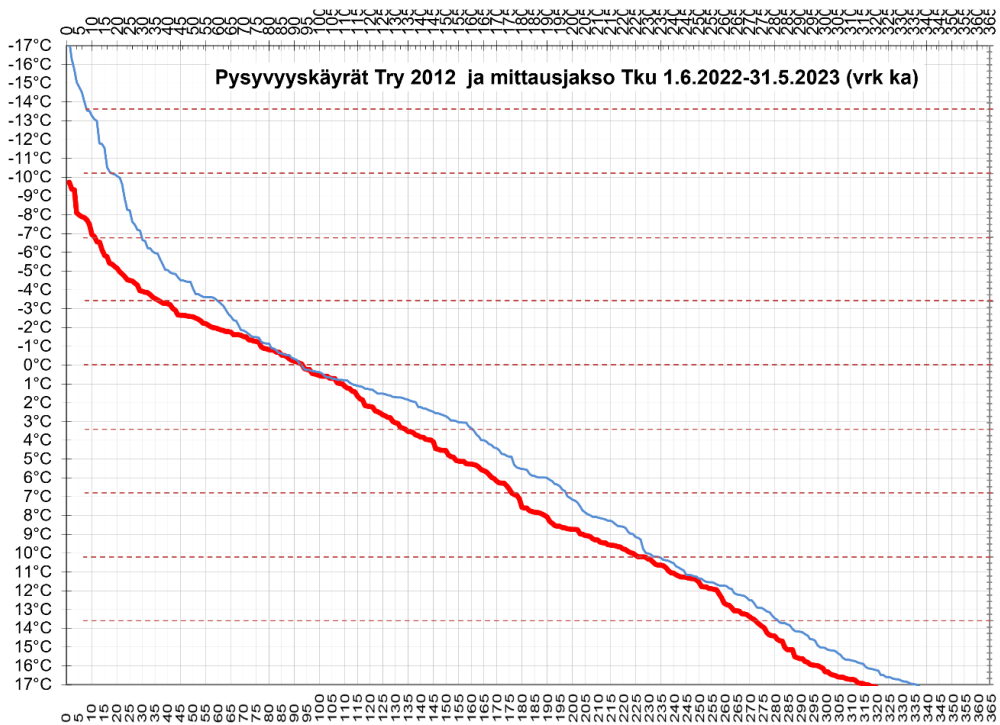
Lisäksi EM196, EM197 ja EM27 ovat varmistustarkoitukseen ja järjestelmän yleisseurantaan tarkoitettut mittarit.

### **3.4 Mittauksen käynnistyminen ja mittausjakso**

Mittauksen aikana vallinnut globaali pandemia ja elektroniikan saatavuusongelmat viivastyttivät mittauksen aloitusta. Suunnitellut energiamittarit saatiin todennettua ja toimintakuntoon 30.9.2021. Lämmitysjärjestelmän vaihtventtiiliä korjattiin toukokuun 2022 lopussa, jonka jälkeen vuoden mittausjakso käynnistyi.

Mittausjakso oli 1.6.2022–31.5.2023. Lämmitystarveluku eli astepäiväluku tällä vuoden mittausjaksolla oli 3730, joka on 4 prosenttia pienempi kuin keskimääräinen lämmitys-tarve vuosina 1990–2020. Kun myös käyttöveden osuus huomioidaan, lämmitysenergi-an tarve oli mittausjaksolla noin 3 prosenttia pienempi kuin edellisen 30 vuoden keski-määräinen lämmitystarve.

Mittausjakson matalin vuorokauden keskilämpötila oli -10 °C. Pysyvyysskäyrä vuorokau-den keskilämpötiloista on esitetty kuvassa 22 paksumpana punaisena viivana. Ohuem-malla viivalla on kuvattu energiatodistuslaskennan testivuotta TRY2012.



**Kuva 22.**

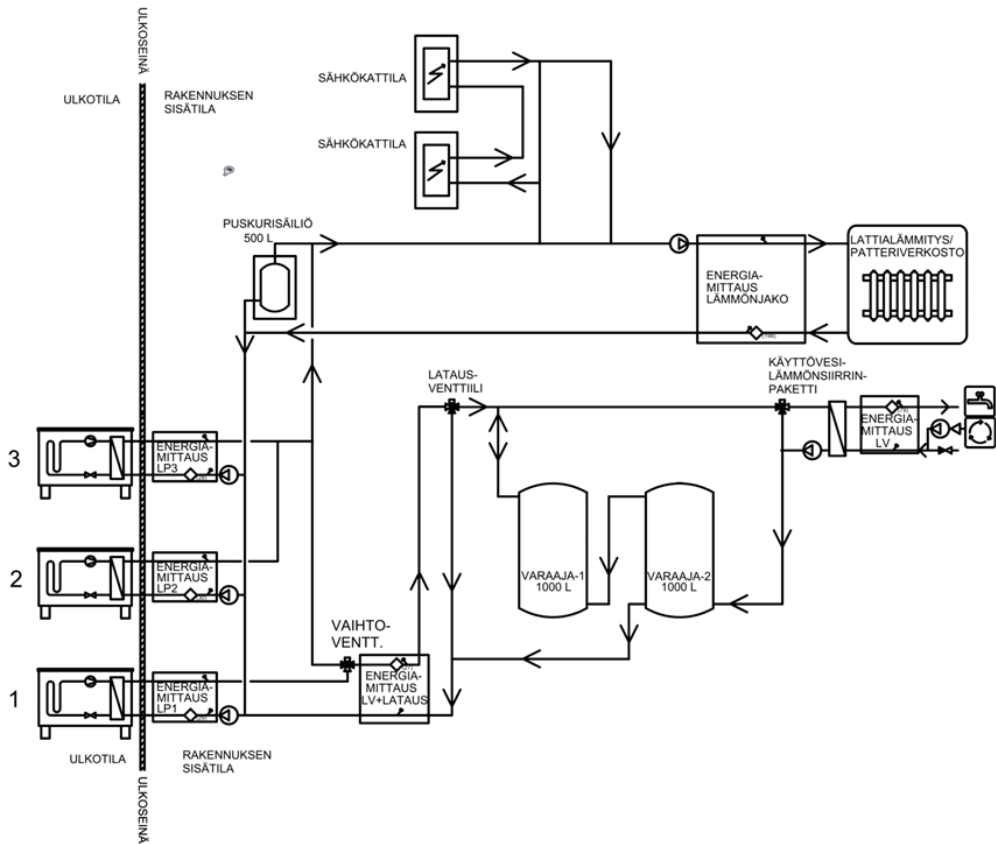
Mittausjakson ulkolämpötilan (punainen paksumpi kuvaaja) ja vuoden vertailujakson TRY 2012 (ylempi kuvaaja) pysyvyyssäyrät vuorokauden keskilämpötiloista.

# Lämpöpumpun toiminta mittausten valossa

---

A large, abstract yellow graphic on the right side of the page, consisting of several overlapping, irregular shapes that form a stylized number '4'. The number is centered within the graphic.

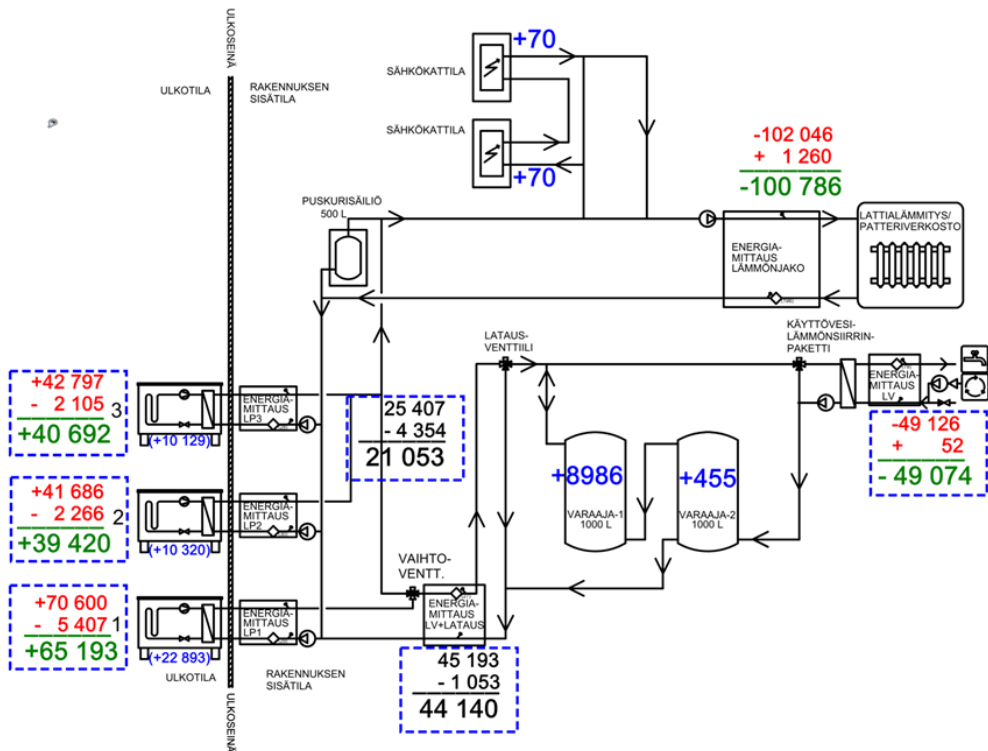
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ilma-vesilämpöpumpun toimintaa kiinteistön pääasiallisena energian lähteenä ja toisaalta LVI-laitoksen toimintaa lämpöpumpun kanssa. Laaja mittausaineisto antoi hyvin täsmällisen kuvan 23 laitoksen toiminnasta, tuotetuista lämpömääristä, lämpökertoimista, sekä järjestelmän häviöistä. Kuvassa 23 on esitetty energiamittauksen sijainnit.



Kuva 23.  
Energiamittarit.

## 4.1 Tuotetut lämpömäärät ja lämpökertoimet

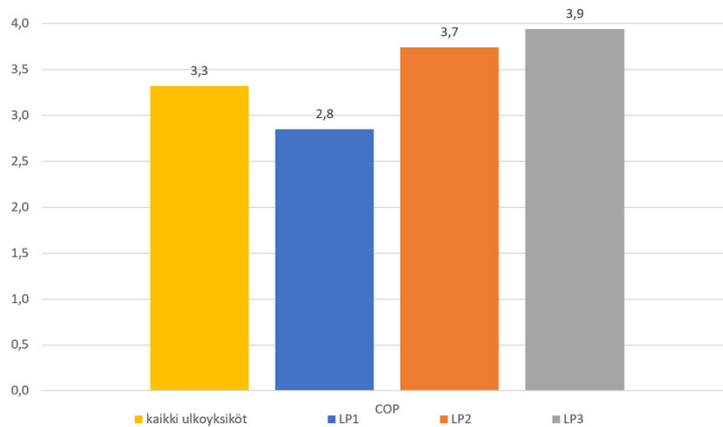
Kaikki kolme lämpöpumppua tuottivat lämpöä yhteensä 155 083 kWh. Lämpöpumpujen ulkoilmasta ottama lämpömäärä oli näin 101 548 kWh, josta höyrystinpattereiden sulatukseen ja ulkoyksiköiden lämpöhäviöihin kului 9 778 kWh. Mittausjakson aikana lämpöpumput käyttivät sähköenergiaa yhteensä 43 757 kWh. Lämpöpumpuista LP1 tuotti ensisijaisesti käyttövettä ja lämpöpumput LP2 ja LP3 palvelevat vain kiinteistön lämmitystä. Kuvassa 24 on esitetty lämpöpumppukohtaisesti tuotettu lämpö, ulkoyksikön lämpöhäviöt mukaan lukien sulatus, ulkoyksikön järjestelmään syöttämä lämpö ja kuluttama sähkö.



Kuva 24.

Energiamittareiden lukemat ja sähkökäyttö.

Kun sulatusenergialla ja ulkoysiköiden lämpöhäviöillä vähennetty lämpöpumppujen tuottama lämpömäärä 145 305 kWh jaetaan sen tuottamiseen käytetyllä sähkön määrällä 43 757 kWh, saadaan ulkoysiköiden keskimääräiseksi vuosilämpökertoimeksi 3,3 ja vastaavasti lämpöpumppuyksiköiden vuosilämpökertoimiksi 2,8, 3,7 ja 3,9. Nämä vuosilämpökertoimet poikkeavat toisistaan, koska käyttövetä pääasiassa lämmittävä LP1 tuottaa huomattavasti lämpimämpää vettä kuin LP2 ja LP3, jotka palvelevat pelkästään lämmitysverkosta. Lämpöpumppukohtaiset lämpökertoimet on esitetty kuvassa 25.

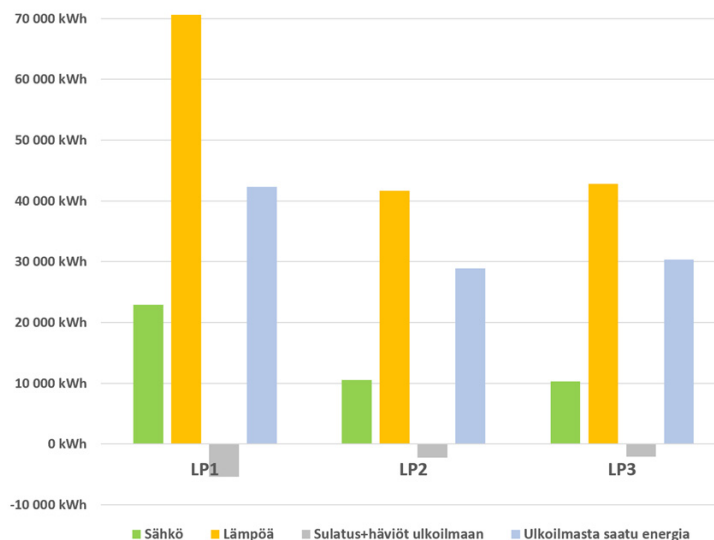


**Kuva 25.**

Lämpöpumppujen (ulkoyksiköiden) lämpökertoimet.

Lämpöpumppukohtaisten lämpökertoimien laskennassa tuotettu energiamäärä on mitattu energiamittarilla ulkoyksikköön menevästä ja tulevasta putkesta. Sähkön kulutus on saatu mittaamalla ulkoyksikköön ja ulkoyksikön kiertovesipumppuun syötetty sähköenergia.

Kuvassa 26 on esitetty lämpöpumppukohtaisesti kulutettu sähkö, tuotettu lämpö, ulkoyksikön lämpöhäviöt mukaan lukien sulatus, sekä ulkoilmasta saadun energian määrä.



**Kuva 26.**

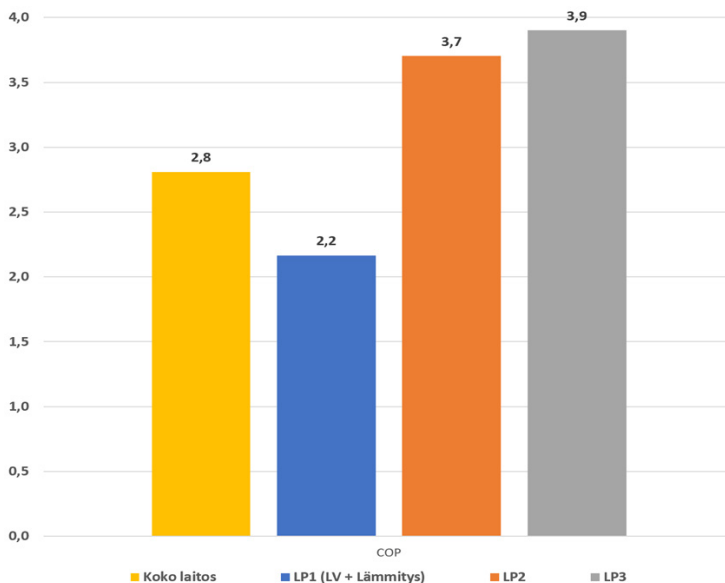
Lämpöpumppujen LP1, LP2 ja LP3 kuluttama sähkö, tuotettu lämpömäärä, laitteiston sulatus ja lämpöhäviöt ulkoilmaan, sekä ulkoilmasta otetun energian määrä (sulatus ja häviöt vähennettynä).



Kuvassa 27 on esitetty lämpöpumppujen lämpökertoimet, kun vastusten käyttö on huomioitu. Lämpökertoimien laskennassa on käytetty lämmönjaon energiamittareiden kumulatiivista kertymää, siis lämmönjakoon saatua energiamäärää. Lämmönjakohuoneen ja ulkoyksiköiltä tulevan putkituksen häviöt tulevat tässä tarkastelussa huomioiduksi ja vähentävät lämpökerrointa vastusten sähkökäytön tapaan.

LP2 ja LP3 lämmittivät vain lämmitysjärjestelmää ja lämmityksen vastuskäyttö oli vain 140 kWh. Tämä ei vaikuta näiden lämpöpumppujen pyöristettyihin lämpökertoimiin.

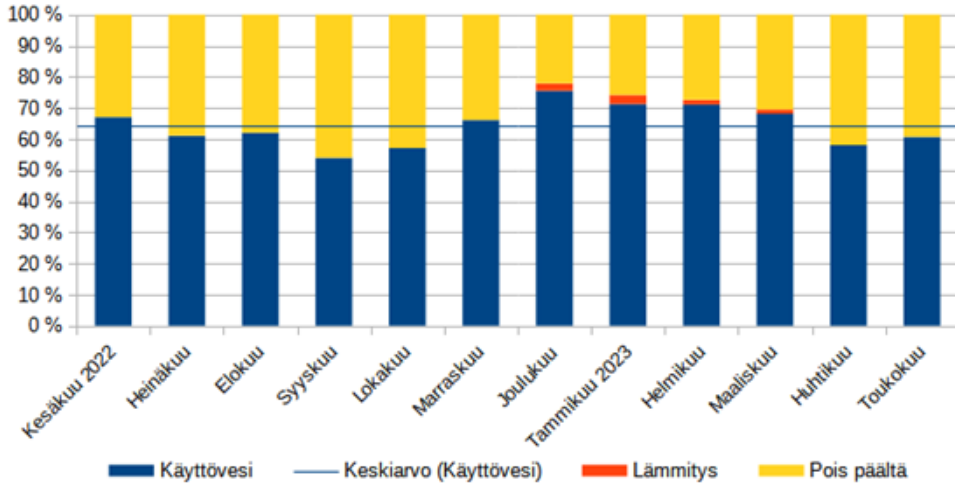
Lämpöpumppu LP1 on tarkoitettu palvelemaan ensisijaisesti käyttöveden lämmitystä. Automaattikka voi kuitenkin tarvittaessa ohjata sen lämmittämään myös lämmitysverkkoa. Näin on tapahtunutkin noin 60 tunnin ajan vuoden kestävä mittaussjakson aikana. Ajallisesti tämä on selvästi alle prosentti käyntiajasta. Silti mittausten mukaan LP1:sen tuottamasta energiasta 32 % päätyi lämmitysverkkoon ja vain 68 % käyttöveden lämmitykseen. Tämä johtuu vesijärjestelmän hallitsemattomasta virtauksesta, jonka seurauksena käyttöveden lämmittämiseen tarkoitettua kuumaa vettä virtasi lämpöverkkoon vaihteleva määrä ja keskimäärin 81 l/h.



**Kuva 27.**

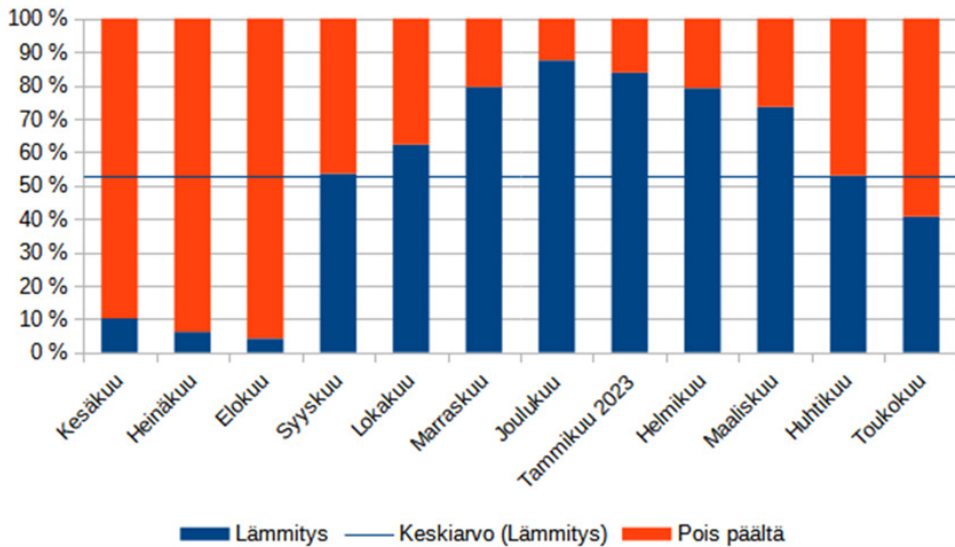
Koko laitoksen ja yksiköiden keskimääräiset lämpökertoimet tutkimuksen ajalta vastuskäyttö huomioiden.

Lämpöpumppujen käyntiaika prosentteina kokonaisajasta on ollut yksiköittäin 65,1 %, 52,8 % ja 52,7 %. Lämpöpumppujen LP1 ja LP2 käyntiajat kuukausittain on esitetty kuvissa 28 ja 29.



Kuva 28.

Käyttöveden lämmitykseen tarkoitetun lämpöpumpun LP1 käyntiajat kuukausittain.



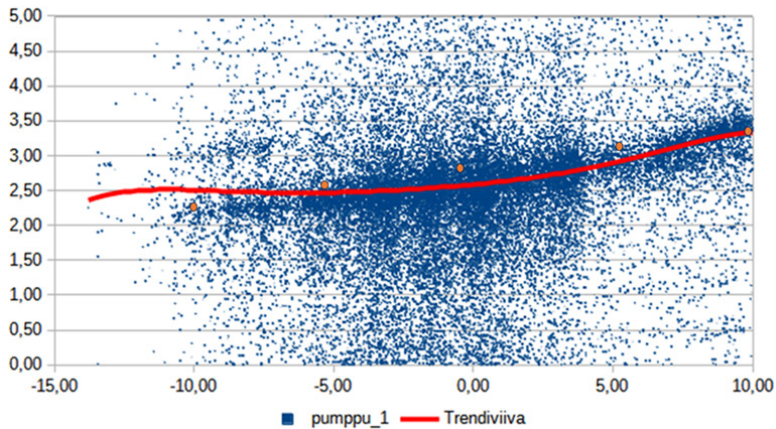
Kuva 29.

Lämpöpumpun LP2 käyntiajat kuukausittain. Lämpöpumppujen LP2 ja LP3 käyntiajat ovat hyvin samankaltaiset ja siksi lämpöpumpusta LP2 ja LP3 ei esitetä erillistä kuvaa.

Kuten aiemmin on todettu, riippuu lämpöpumpun hetkellinen lämpökerroin höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen välisestä lämpötilaerosta. Lämpöpumpuilla on kaksi tehtävää, lämmitysenergian syöttäminen lämmitysjärjestelmään ja käyttöveden lämmitys. Lämmitysverkkoon syötettävän energian lämpötilataso on ollut enimmäkseen enintään 35 °C. Käyttöveden lämmityksessä vaihteluväli on suurempi ja lämpöpumppu on pyrkinyt tuottamaan 55-asteista vettä.

Kaikki järjestelmän tiedot on tallennettu minuutin välein. Kuvassa 30 on esitetty käyttövesijärjestelmään lämpöä syöttävän lämpöpumpun lämpökerroin ulkolämpötilan funktiona. Kuvassa on tiheä pistepilvi, koska aina lämpöpumpun toimintatilan vaihtuessa lämmön syöttö alkaa tai päättyy. Näitä muutaman minuutin kestäviä muutostilanteita mahtuu vuoteen valtava määrä niin kuin pistepilvestä nähdään. Vastaavasti lämpöpumpun käynnistyessä kompressori ottaa tehoa, mutta lämmönsiirtimessä oleva vesi ei ole vielä ehtinyt lämmetä. Lämpöpumpun pysähtyessä laitteesta tulee vielä lämmintä vettä, vaikka kompressori ei enää käy. Näissä tilanteissa lämpökerroin saa hurjia arvoja, mutta kun kaikki pisteet huomioidaan, hahmottuu todellinen kokonaiskuva. Vaikka pistepilvet näyttävät tolkkuttomilta, saadaan todellinen tilanne näkyviin lisäämällä kuvaan trendiviivat, jotka edustavat kaikkien pisteiden avulla laskettuja keskiarvoja. Näitä trendiviivoja voidaan verrata kuvan 19 valmistajan ilmoittamaan lämpökerroinkäyrään.

Trendiviivan läheisyyteen piirretyt pyöreät pisteet ovat valmistajan ilmoittamia arvoja. Kovilla pakkasilla mitattuja arvoja on niin vähän, ettei mitatun ja valmistajan ilmoituksen välistä eroa voi pitää merkittävänä. Kuitenkin ulkolämpötilojen -5 ja +5 °C välillä voidaan nähdä mitattujen pisteiden merkittävää hajontaa ja trendiviiva kulkee valmistajan ilmoittamaa alempana. Tämä johtuu sulatuksen energiantarpeesta. Osa lämpöpumpun tuottamasta energiasta joudutaan käyttämään höyrystinpatteriin muodostuvan jään sulatukseen, ja tätä ei valmistajan käyrissä huomioida.

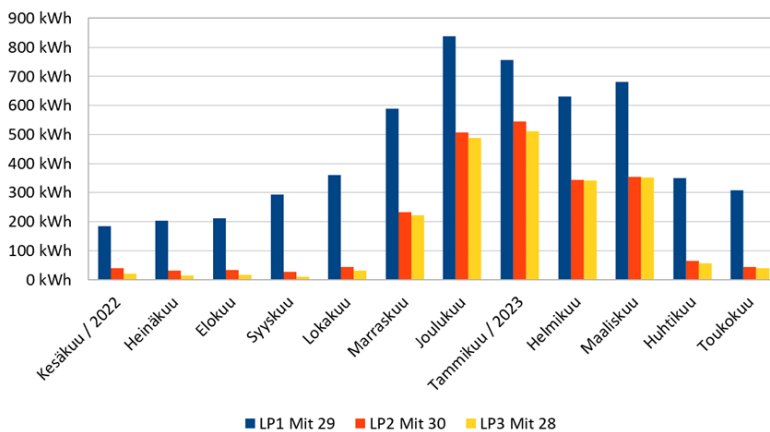


**Kuva 30.**

Käyttövettä lämmittävän lämpöpumpun lämpökerroin ulkolämpötilan funktiona. Pöyreät oranssit pisteet ovat laitevalmistajan ilmoittamia arvoja.

## 4.2 Häviöt

Ylivoimaisesti suurin osa lämpöpumppujen tuottamasta energiasta päättyy juuri sinne, minne se on tarkoitettukin. Lämpöpumppujen toimintaa kuvataan usein suoritusarvoilla, mitkä eivät huomioi kaikkia laitteen toiminnasta aiheutuvia häviöitä. Pumppujen ja puhaltimien tehot on yleensä huomioitu, mutta höyrystinpatterin sulatuksen ja laitteen omien lämpöhäviöiden esittämisessä on kirjavuutta. Osa lämpöpumpun tuottamasta energiasta tarvitaan höyrystinpatterin sulatukseen ja osa vuotaa lämpöhäviöinä ympäristöön. Seuraavassa tarkastellaan näitä lämpövirtoja ja niiden merkitystä lämpöpumppujen kokonaistalouteen.



**Kuva 31.**

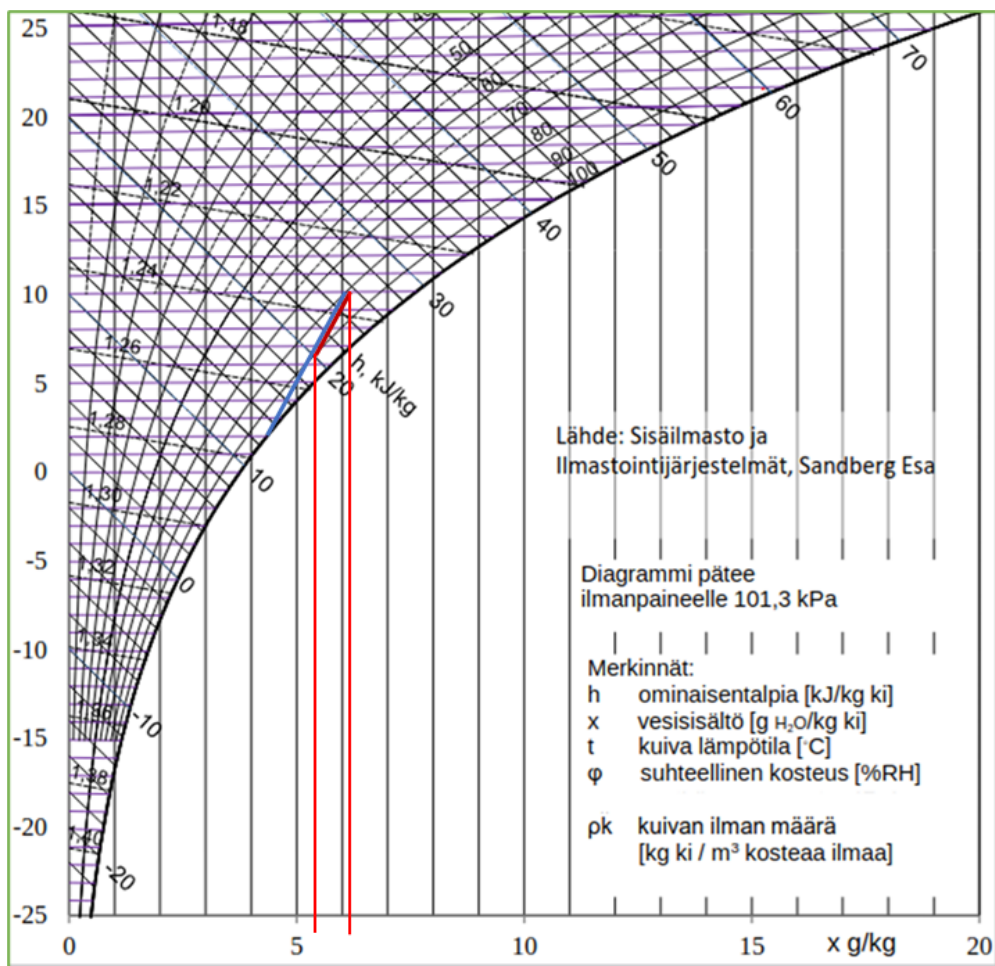
Lämpöpumppukohtaiset lämpöhäviöt kuukausittain.

### 4.3 Sulatus

Sulatuksesta tehtiin tämän tutkimuksen yhteydessä insinöörin opinnäytetyö, joka on löydettävissä Theseuksesta: Alekski Elomäki, ”Ilma-vesilämpöpumpun sulatusenergian määrittäminen”.Tässä raportissa Elomäen työstä esitetään vain perusteet ja tulokset.(2)

Kuten aiemmin on kerrottu, on tutkittavien lämpöpumppujen höyrystin tyypiltään suorahöyrysteinen kupari-alumiinipatteri. Patterissa kylmäaine kulkee kupariputken sisällä. Lämmönsiirto tapahtuu kylmään kiehuvaan kylmäaineeseen. Kupariputkien ulkopuolella ovat alumiinilamellit. Alumiinilamellien tarkoituksena on kasvattaa putken ulkoilmaa vasten olevaa pinta-alaa. Tämä on tärkeää, koska lämmönsiirtokerroin ilmasta putkeen on kertaluokkia heikompi kuin putkesta kiehuvaan kylmäaineeseen. Tätä heikompa lämmönsiirtokerrointa kompensoidaan moninkertaisella pinta-alalla. Jäähtyvä ulkoilma kulkee alumiinilamellien välisissä ahtaissa väleissä. Koska pääosa lämmönsiirrosta tapahtuu kiehuvaan nesteeseen ja kylmäaine kiehuu vakioaineessa vakioämpötilassa, voidaan patterin lamellien olettaa olevan lähes vakio ja lähellä höyrystymislämpötilaa. Siksi patteriin tuleva kostea ulkoilma kohtaa heti hyvin kylmät, lähes vakioämpötilassa olevat lamellit.

Ulkoilma on aina kuivan ilman ja vesihöyryn seos. Kuivaltakin tuntuvassa ilmassa on aina vähän vesihöyryä ja kosteassa ilmassa on vesihöyryä paljon. Ilman tilaa kuvataan usein Mollier-diagrammilla (kuva 32). X-akselilla on ilman vesisisältö  $\text{kg}_{\text{vettä}}/\text{kg}_{\text{ilmaa}}$ . Ulkoilman tilapiste selviää kaaviosta, kun y-akselilta etsitään ensin ilman lämpötila ja sitten seurataan tätä lämpötilaviivaa, kunnes tullaan oikealle suhteellisen kosteuden viivalle. Näiden viivojen leikkauspisteessä on ilman tilapiste.



Kuva 32.

Ulkoilman tilanmuutos Mollier-diagrammissa esitettyinä.

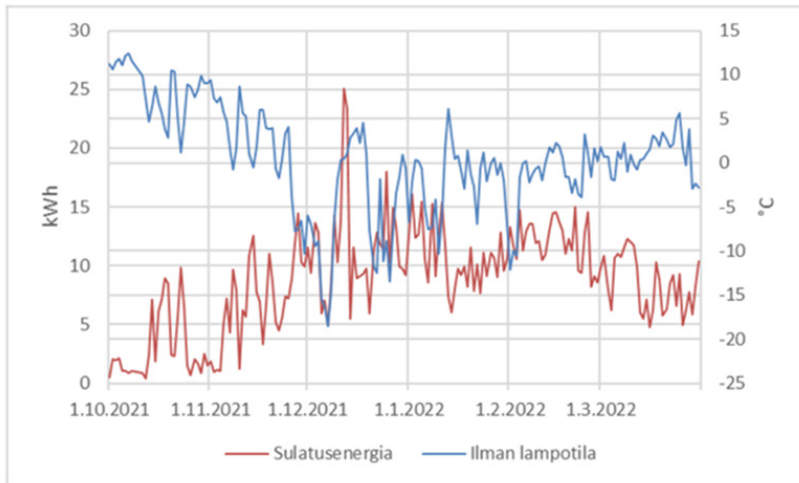
Ilmassa pysyy vain tietty lämpötilasta riippuva määrä höyryn olomuodossa olevaa vettä. Jos tämä määrä ylittyy, tiivistyy liika vesi nesteen olomuotoon ja tippuu pois. Ilmassa pysyy höyryä sitä enemmän, mitä lämpimämpää ilma on. Ilmaa jäähdyttämällä saavutetaan kylläinen tila, jossa ilmassa on tarkalleen maksimimäärä vesihöyryä. Jos jäähdytystä jatketaan, alkaa vettä tiivistyä nesteeksi. Jos jäähdyttävän pinnan lämpötila on nollan alapuolella, voi vesi jäätymään pintaan kiinni. Näin tapahtuu höyrystinpatterissa.

Sitä mitä ilmalle patterissa tapahtuu, tarkastellaan Mollier-kaavion avulla (Kuva 32). Patterissa lamellien pintalämpötila on hieman höyrystymislämpötilan yläpuolella johtuen lämmönsiirtokertoimien ja lämmönjohtavuuksien aiheuttamasta lämmönsiirtovastuksesta. Nyt etsitään y-akselilta lamellin pintalämpötila ja sitä lämpötilaviivaa seurataan oikealle niin pitkälle, että kohdataan sataprosenttisen suhteellisen kosteuden käyrä, jota myös kylläisyyskäyräksi kutsutaan. Ulkoilman tila muuttuu ulkoilman tilapisteen ja tämän löydetyn pisteen välistä janaa pitkin ilman jäähtyessä. Jäähtyminen jatkuu niin pitkälle kuin jäähdysteho riittää. Koska tätä janaa pitkin liikuttaessa x-koordinaatti alkaa muuttua heti, kun ulkoilma tulee höyrystinpatteriin, se tarkoittaa kosteuden lauhduttamista vedeksi. Mitä suurempi on x-koordinaatin muutos, sitä enemmän vettä patteriin tiivistyy. Kuvassa 32 on esimerkkinä piirretty tilanne, jossa ulkoilman tila on 10 °C ja suhteellinen kosteus 80 %. Lamellien pintalämpötila on 2 °C. Esimerkkitalanteessa ilma jäähtyy n. 6,5 asteeseen ja vesisisältö x pienenee noin 1 g/kg<sub>ki</sub>. Tutkimuskohteen ulko-yksikön ilmavirta on noin 4500 m<sup>3</sup>/h. Ilman tiheys on noin 1,25 kg/m<sup>3</sup> ja silloin ulko-yksikön läpi virtaa 5625 kg ilmaa tunnissa. Jokaisesta ilmakiloista poistuu 1 gramma vettä, eli ulko-yksikön lauhdeputkesta tulee vettä noin 5,6 kg/h.

Jos patterin pinta on tarpeeksi kylmä, alkaa lamellien pinnoille kertyvä jää pienentää ilman virtausalaa. Lämpöpumpun automatiikka kuitenkin estää tukkeutumisen aloittamalla sulatustoiminnon, kun jäätä on muodostunut niin paljon, että se haittaa toimintaa. Sulatuksen tarpeeseen vaikuttavat siis ulkolämpötila, ulkoilman kosteus sekä höyrystymislämpötila.

Yleensä höyrystymislämpötila asettuu noin 8 celsiusastetta ulkoilman lämpötilaa alemmas ja lamellien pintalämpötila taas 2–3 astetta höyrystymislämpötilan yläpuolelle johtuen lämmönsiirtokertoimien ja lämmönjohtavuuksien aiheuttamista vastuksista lämmön siirtymiselle. Painovoima vetää lamellin pinnalle tiivistynyttä vettä alaspäin, ja jos vesi ehtii valua ulos patterista ennen kuin se on jäähtynyt jäätympisteeseen, jäätymistä ei tapahdu. Näistä syistä jäätyminen on voimakkainta silloin, kun ulkolämpötila on lähellä nollaa. Tästä esimerkkinä on esitetty valitulta ajanjaksolta ulkolämpötila ja sulatukseen käytetty energiamäärä (1.), (kuva 33).

Tutkimuskohteen lämpöpumpuissa sulatus tapahtuu vaihtamalla 4-tieventtilin avulla lauhduttimen ja höyrystimen rooleja. Tällöin kompressorin kuumakaasu sulattaa jään. Markkinoilla on myös toisenlaisia sulatusjärjestelmiä. (1)

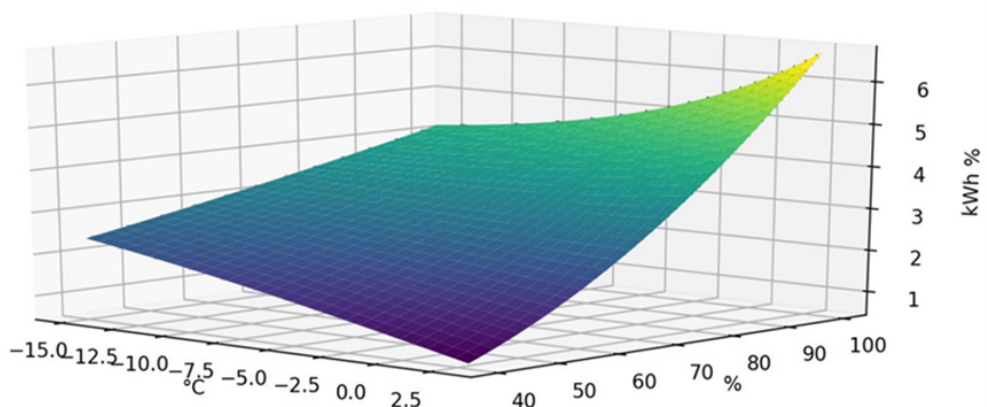


**Kuva 33.**

Sulatusenergian ja ulkolämpötilan riippuvuus toisistaan valitulla tarkastelujaksolla.

Elomäki laati lämpöpumpun *LP1* mittaustulosten perusteella mallifunktion, joka kuvaa suurella tarkkuudella sulatusenergian osuutta lämpöpumpun tuottamasta kokonaislämpömäärästä. Tämä on siis tuotettua lämpöä, jota ei voida käyttää kiinteistön lämmitykseen, vaan se tarvitaan prosessin ylläpitoon. Mallifunktion tulokset voidaan esittää pintadiagrammina (kuva 34).

Sulatusenergian tarve on suurimmillaan, kun ulkolämpötila on hieman nollan yläpuolella ja ilma on kosteaa. Tarkastelujakson aikana sulatukseen tarvittiin keskimäärin 4,6 % lämpöpumpun *LP1* tuottamasta energiasta. Sulatusenergian tarpeesta löytyi myös muiden tekemä tutkimus. (5)



**Kuva 34.**

Mallifunktiolla määritetty sulatusenergian osuus tuotetusta lämpöenergiasta ulkolämpötilan ja ulkoilman suhteellisen kosteuden funktiona.



Elomäki tarkasteli työssään nimenomaan sulatukseen käytettyä energiaa valitun ajanjakson aikana. Mittausjakson päätyttyä voitiin kuitenkin määrittää kaikkien lämpöpumpujen tuottamat kokonaislämpömäärät sekä järjestelmästä lämpöpumpputyksiköihin virranneet lämpömäärät. Järjestelmästä lämpöpumpuille virrannut lämpö kului höyrystinpattereiden sulatukseen sekä ulkoyksiköiden lämpöhäviöihin. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2.**

Lämpöpumpputyksiköiden tuottama lämpö, sulatukseen ja lämpöhäviöihin kulunut lämpö sekä näiden prosenttiosuudet.

	<i>LP1</i>	<i>LP2</i>	<i>LP3</i>	Yhteensä
Lämpöpumpun tuottama lämpö kWh	70 600	41 686	42 797	155 083
Sulatus ja ulkoyksikön lämpöhäviöt kWh	-5 407	-2 266	-2 105	-9 778
Tuotettu nettolämpö kWh	65 193	39 420	40 692	145 305
	-7,7 %	-5,4 %	-4,9 %	-6,3 %

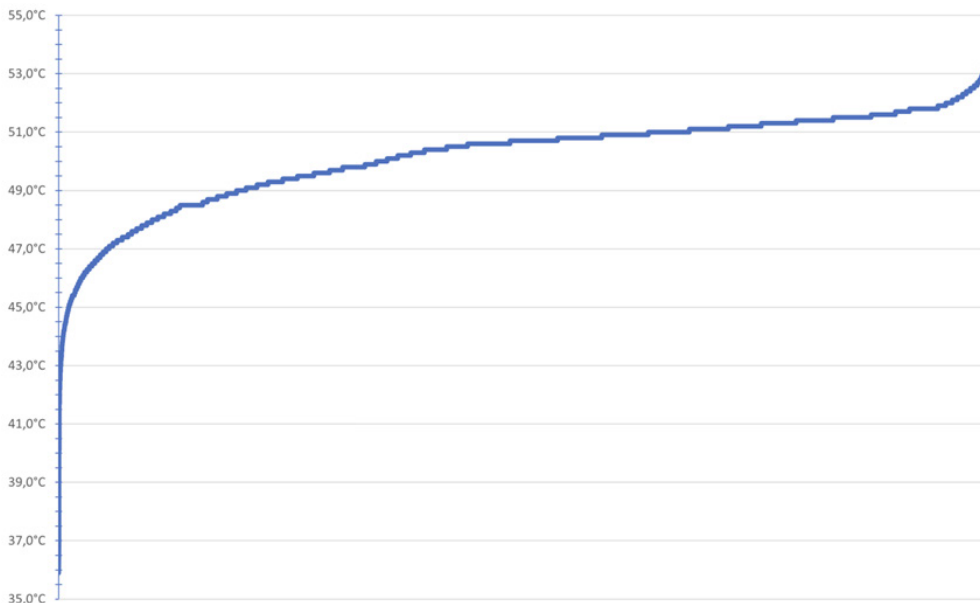
Lämpöpumpun *LP1* häviöt ovat muita lämpöpumppeja suurempia, koska käyttöveden lämmityksessä lämpötilat ovat korkeampia. Lämpöpumpukohtaiset lämpöhäviöt kuukausittain on aiemmin esitetty kuvassa 31.

#### 4.4 Käyttöveden lämpötila

Lämpimän käyttöveden tulee olla riittävän kuumaa, jotta mikrobit eivät lisääntyisi putkistoissa. Suomen asumisterveysasetus (8.) edellyttää, että vesikalusteesta saadaan vähintään 50- ja enintään 65-asteista vettä. Näin voidaan varmistua siitä, etteivät legionella-bakteerit aiheuta terveyshaittoja. Vallitsevan käsityksen mukaan legionella-bakteerit kuolevat ajan myötä yli 50 °C lämpötilassa. Talotekniikkainfo (10.) ohjeistaa suunnittelijalle käyttöveden lämpötilaksi rakennusten vesi- ja viemärlaitteistojen asetuksen mukaisesti vähintään 55 °C. Ruotsalaisen Säker Vatten -organisaation suosituksen mukaan (9.) käyttöveden kiertojohdossa veden tulisi olla jatkuvasti vähintään 55 °C ja lämpötilan pitäisi käydä viikoittain yli 60 asteessa.

Kuten jo aiemmin on esitetty lämpöpumpun tuottama lämpö on sitä edullisempaa, mitä alhaisemmassa lämpötilassa sitä voidaan hyödyntää. Nykyisin yleisimmin käytettävien kylmäaineiden korkeimmat sallitut lauhtumislämpötilat ovat suuruusluokkaa 65–70 °C, koska korkealla painesuhteella kompressorin jälkeisen kuumakaasun tulistuslämpötilat

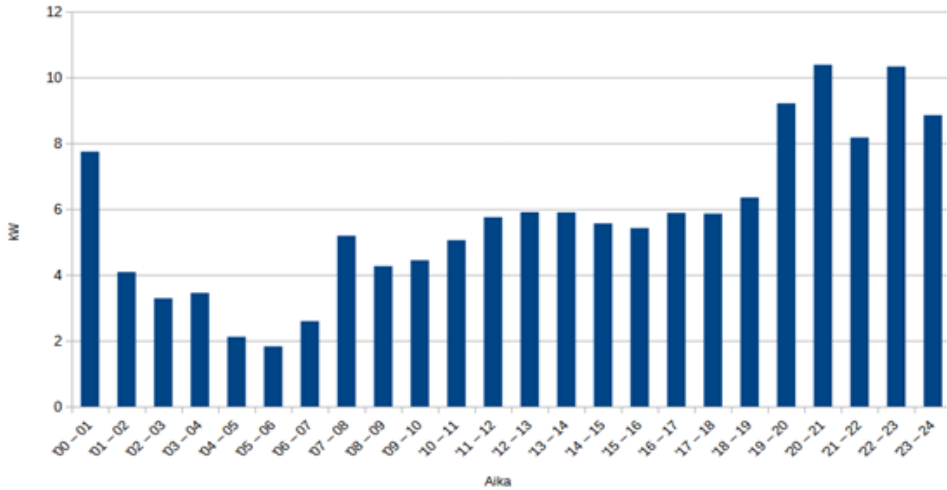
nousevat liian korkeiksi. Käyttöveden lämmitys suoraan kylmäaineella ei ole sallittua, vaan väliin tarvitaan vesipiiri. Tämän vuoksi lämpöpumppu lämmittää lauhduttimessa lämmityspiirin vettä, joka lämmönsiirtimessä tai kierukassa lämmittää käyttövettä. Jokainen lämmönsiirrin tarvitsee lämpötilaeron, jotta lämpö siirtyisi. Riittävän korkean lämpötilatason ylläpito on lämpöpumpuissa yleinen ongelma, joka tässäkin laitoksessa mittauksissa havaittiin. Kuvassa 35 on mittauksiin perustuva käyttöveden lämpötilan pysyvyyskäyrä. Y-akselilla on käyttövesiverkostoon lähtevän veden lämpötila ja X-akselilla on lämmityskauden minuutit eli aika. Käyrästä voidaan nähdä, että suuren osan ajasta lämpötila on ollut sellaisella tasolla, että legionella elää ja lisääntyy. Lämpötila ei mittausjakson aikana missään vaiheessa kohonnut niin korkeaksi, että se olisi varmuudella kokonaan poistanut legionella-kasvustoa putkistosta. Tämä aiheuttaa potentiaalisen terveysriskin, jota on ehdottomasti syytä selvittää lisää.



**Kuva 35.**

Käyttövesikiertoon lähtevän veden lämpötilan pysyvyyskäyrä lämmityskaudella.

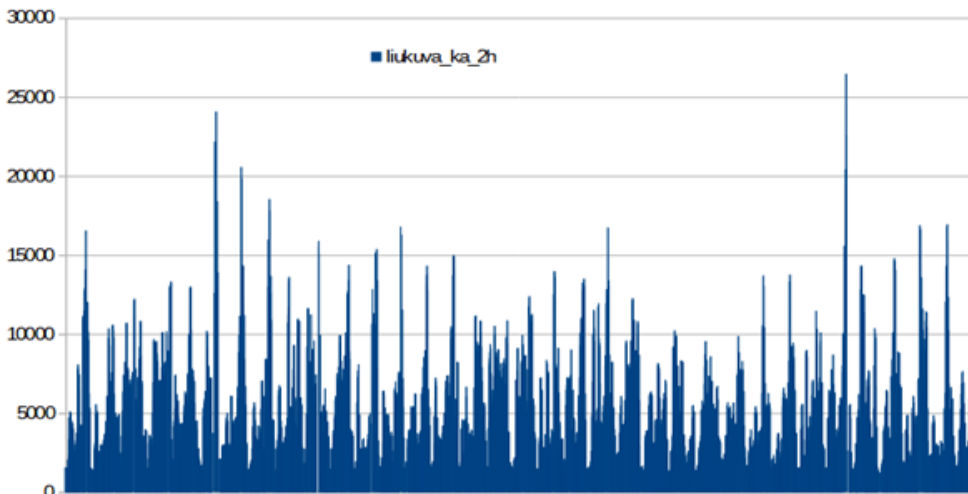
Lämpimän käyttöveden käyttäminen aiheuttaa hyvin suuria hetkellisiä kulutushuippuja, jotka moninkertaisesti ylittävät lämpöpumppujen kapasiteetin. Jos yhden suihkun vesi lämmitettäisiin käyttölämpötilaan suoraan läpivirtauslämmittimessä, tarvittaisiin siihen noin 30 kW teho. Isossa talossa on iltaisin tyypillisesti käytössä useita suihkuja samanaikaisesti, ja siksi järjestelmään on rakennettu varauskapasiteettia. Kuvassa 36 on esitetty käyttövedeen keskimäärin tarvittava lämmitysteho vuorokauden tunteina. Siitä huolimatta, että suihkujen käyttö aiheuttaa minuuttien pituisia kymmenien kilowattien kulutushuippuja, on keskimääräinen tehontarve suuruusluokkaa 10 kW. Tämä edellyttäisi hyvin suurta varauskapasiteettia.



**Kuva 36.**

Keskimääräinen tuntikohtainen lämmöntarve käyttöveden lämmitykseen.

Satunnaiset kulutushuiput ja niistä johtuva käyttöveden riittämättömyys muodostavat ongelman. Kuvassa 37 on esitetty tyypillinen tarkastelujakso, jossa käyttöveden lämmityksen tehon tarve on esitetty kahden tunnin liukuvana keskiarvona. Siinä mainittujen kulutushuippujen vaikutus näkyy selvästi.



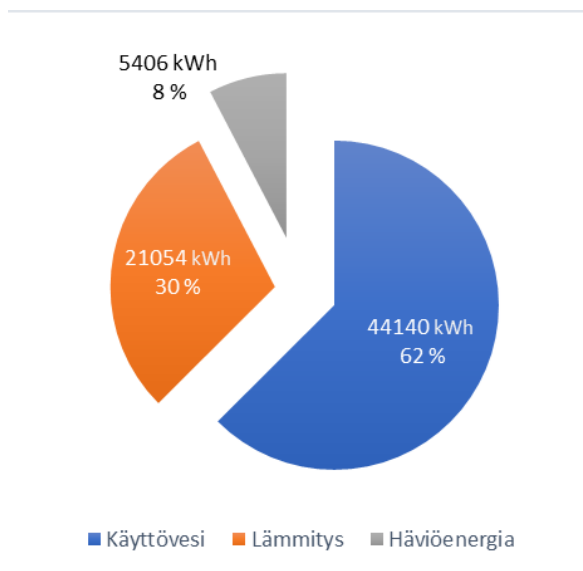
**Kuva 37.**

Käyttöveteen tarvittava lämmitysteho kahden tunnin liukuvana keskiarvona tarkastelujakson aikana.

Kuvasta 37 voidaan havaita, että suurimmat kahden tunnin huipputehot ovat tasolla 25 kW. Tästä voidaan päätellä, että lämmitystarpeesta selviytyminen, ilman sähkövastusten käyttöä, edellyttäisi 50 kWh:n lämpömäärän varauskapasiteettia riittävän korkealla lämpötilatasolla. Varauskapasiteetti on kallista ja nykyisellä kytkennällä varauskapasiteetti ei tätä vaatimusta täytä, vaan huiput hoidetaan sähkövastuksilla. Lisäksi käyttöveden lämpötila putoaa selvästi.

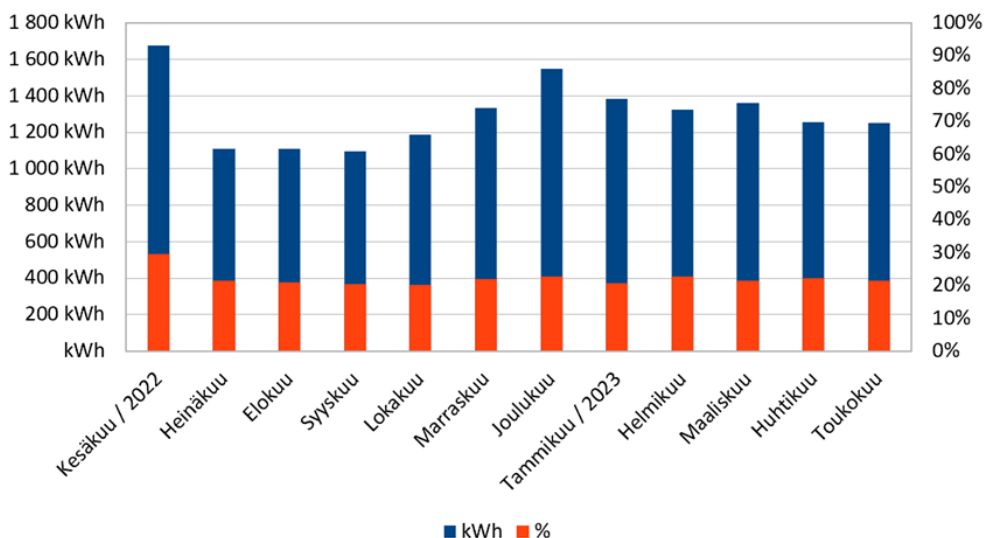
#### 4.5 Vaihtoventtiilin vuoto mittausjakson aikana

Kuten luvussa 1.4 on kerrottu, vuonna 2021 havaittiin järjestelmän vaihtoventtiilin asennusvirhe, joka johti venttiilin väärään asentoon käyttövesitilassa. Ongelmaa korjattiin toukokuussa 2022. Mittaukset osoittavat kuitenkin, että korjauksesta huolimatta venttiili ei ole toiminut niin kuin automatiikka olisi edellyttänyt. Automaatio on ohjannut lämpöpumpun LP1 tuottamaan lämmitysenergiaa vain 60 tuntia vuodessa käytäjästä, mutta mittauksen mukaan jopa 30 % lämpöpumpun tuottamasta energiasta on kuitenkin ohjautunut lämmitysverkkoon (Kuva 38). Kuvassa näkyvä 8 prosentin osuus sisältää sulatusenergian lisäksi kaikki ulkoyksikköön liittyvät lämpöhäviöt.



**Kuva 38.**

Lämpöpumpun 1 tuottaman energian jakauma.



**Kuva 39.**

Lämpöpumppu 1:n käyttöveden lämmitysenergian vuoto lämmönjakojärjestelmään.

Kun vaihtventtiili on kääntynyt lämmittämään käyttövettä, lämpöpumppu tuottaa noin 55 °C vettä. Kuten kuvassa 39 esitetään, päätyi käyttöveden valmistamiseen tarkoitettua energiaa kuitenkin jatkuvasti lämmityspiiriin, jossa korkein tarvittava lämpötila mittausjaksolla oli alle 35 °C. Lämmityspiiriin tuotettiin noin 21 000 kWh:n lämmitysenergiaa noin 20 celsiusastetta liian korkeassa lämpötilassa ja siten selkeästi huonommalla lämpökertoimella. Karkea arvio vuotavan vaihtventtiilin aiheuttamasta heikomman lämpökertoimen vaikutuksesta lämpöpumpun LP1 kompressorin sähkönkulutukseen vuositasolla on noin 2 000 kWh.

Tämä 21 000 kWh lämmitysenergiaa on siirtynyt ikään kuin vuotona käyttövesipiiristä lämmitysverkon puolelle ja aiheuttaa pientä epätarkkuutta tarkasteltaessa lämpöpumpujen lämpökertoimia käyttöveden ja lämmityspiirin lämmityksessä. Lämpö on kuitenkin pysynyt laitoksessa, eli koko laitoksen tasolla tulokset ovat oikein.

# Laitoksen energiatalous kokonaisuutena

---

5

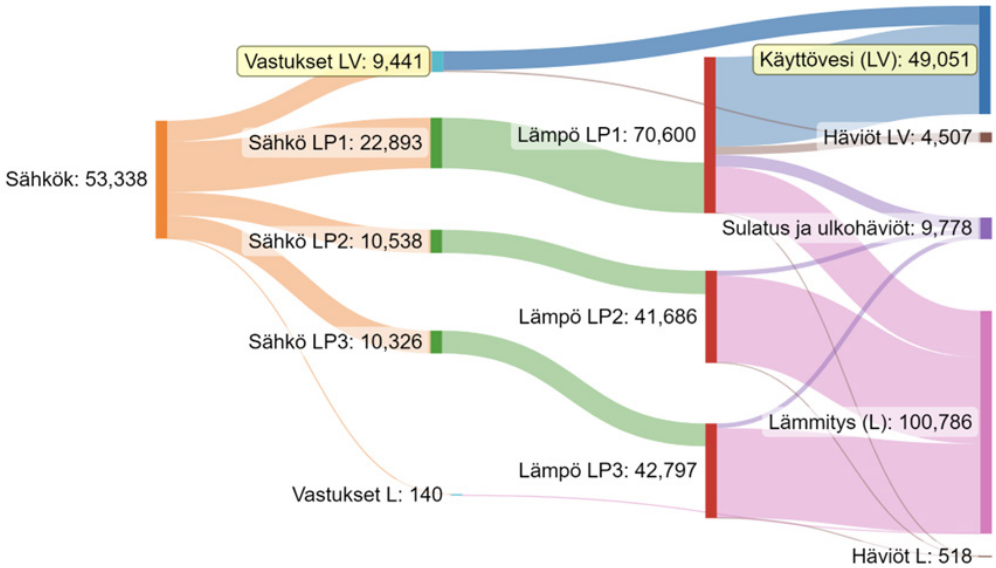
Energiavirtoja voidaan havainnollisesti kuvata Sankey-diagrammilla (kuva 40). Siinä laitoksen energiavirrat esitetään puumaisena vuokaaviona. Kaikki ostoenergia on sähköä. Koko kerrostalon sähkökäyttö oli vuoden mittausjaksolla 73 877 kWh. Huoneistokohtaisten ilmanvaihtokoneiden osuus tuosta määrästä oli 6 871 kWh.

Lämmitysjärjestelmä kulutti sähköä 53 378 kWh. Kaavion vasemmassa reunassa näkyy, miten sähkön käyttö jakaantuu rakennuksen LVI-järjestelmään. Lämpöpumppu *LP1* tuottaa pääasiassa käyttövedettä. Vuoden pituisen mittausjakson aikana *LP1* kulutti sähköä 22 893 kWh ja tuotti sen avulla lämpöä 70 600 kWh. Siitä päätyi pääosa käyttövedeen. Loput päätyi lämmitysjärjestelmään, sulatukseen ja muihin häviöihin. Ulkoilmasta *LP1* otti 47 707 kWh energiaa, josta kuitenkin 5 407 kWh palautui sulatuksen ja ulkoyksikön lämpöhäviöiden kautta ulkoilmaan. Siten *LP1* otti ulkoilmasta häviöt huomioiden 42 300 kWh.

Kun tarkastellaan kaikkia kolmea lämpöpumppua, havaitaan, että *LP1* kulutti enemmän sähköä (22 893 kWh) suhteessa saatuun lämpöön (70 600 kWh) kuin lämpöpumput *LP2* ja *LP3*. Tämä johtuu aiemmin kuvatusta lämpökertoimeen vaikuttavasta lämmönlähteen ja lämmön luovutuksen välisestä lämpötilaerosta. Siksi matalammalla lämpötilatasolla toimivaan lattialämmitykseen syötettävä lämpö on tuotettu merkittävästi pienemmällä sähkökulutuksella. Lattialämmityksen lämpöpumput *LP2* ja *LP3* siis toimivat paremalla lämpökertoimella, eli niiden tuottama lämpö on merkittävästi halvempaa.

Käyttöveden kulutushuippujen leikkaamiseen käytettiin varaajien lämmitysvastuksia 9 441 kWh. Lämmityksen sähkökattilan vastuksia käytettiin vain 140 kWh. Vastusten

osuus koko laitokseen syötetystä lämpömäärästä oli 164 634 kWh eli 6 %. Lattialämmitykseen käytettyjen vastusten osuus lattialämmityksen kokonaisenergiasta oli vain promillen luokkaa, vaikka lämmityskausi ei poikennut energian tarpeeltaan merkittävästi aiemmista vuosista. Tilalämmityksen energiatarpeeltaan mittausjakso oli vain 4 % keskimääräistä vuotta pienempi eli mittausjakso oli vain hiukan keskimääräistä lämpimämpi.



**Kuva 40.**

Sankey-diagrammi laitoksen energiavirroista.

### Lämpöpumppujärjestelmä investointina

Lämpöpumppuinvestointi nähdään hankkeena, jolle asetettujen tavoitteiden tulisi toteutua asetettujen aikarajojen puitteissa. Aikajänne investointipäätöksestä valmiiseen toteutukseen voi olla pari vuotta, ja laitoksen käyttöikä on toivottavasti vuosikymmeniä. Viimeisen kahden vuoden aikana energiamuotojen hintasuhteet ovat voineet kääntyä viikoissa päällelleen, ja siksi syvällisempää euomääräistä tarkastelua ei tässä yhteydessä tehdä.

Suuruusluokan hahmottamiseksi tarkastellaan kuitenkin kohdekiinteistön tilannetta esimerkkilukujen valossa. Oletetaan sähkön kustannukseksi 15 snt/kWh ja kaukolämmön 9 snt/kWh. Kiinteistön energiankulutus vuoden kestävän mittausjakson aikana oli noin 150 000 kWh ja koko laitoksen vuosilämpökerroin oli 2,8.

Kaukolämpötoteutuksessa olisi lämpöä ostettu koko 150 000 kWh hintaan 9 snt/kWh. Lämpöpumpputoteutuksessa saman lämpömäärän tuottamiseksi ostetaan sähköä 150 000 kWh/2,8. Laskelma on esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.**

Lämmityskustannusten vertailu esimerkkihinnoin kaukolämmön ja lämpöpumppu-toteutuksen välillä.

Kaukolämpö			
Energian tarve	COP	Energia, hinta	Vuosikustannus (€)
150 000 kWh	1	0,09	13500

VILP			
Energian tarve	COP	Energia, hinta	Vuosikustannus (€)
150 000	2,8	0,15	8036

Esimerkkihinnoin laskettuna on ulkoilmaa lämmönlähteenä käyttävän lämpöpumppu-laitoksen aiheuttama vuoden energiakustannus 5464 euroa kaukolämpölaitosta alhai-sempi. Tämä laskelma huomioi ainoastaan käyttökustannukset, eikä ota kantaa inves-tointiin tai ylläpitokustannuksiin.

Epävarmuutta laskelmaan aiheuttaa se, että lämpöpumppulaitoksessa huipputehojen kattamiseen käytetään sähkövastuksia ja -kattiloita. Vuosikymmeniä on sähkön hinta muuttunut hyvin rauhallisesti ja huippukulutustunteina sähkö on ollut samanhintaista kuin muutenkin. Sähkön hinnoittelu on kuitenkin voimakkaassa murroksessa. Pörssisäh-kö on vallannut alaa, ja juuri niinä aikoina, kun lämpöpumppujärjestelmä tarvitsee lisä-lämpöä, on sähkön hinta huipussaan. Jatkossa onkin mietittävä, miten kulutshuippujen lisälämmön tarve ratkaistaan.



# Yhteenvedo ja johtopäätökset

---

6

Tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää ilma-vesilämpöpumpun toimintaa suuren kiinteistön pääasiallisena lämmönlähteenä. Lämpöpumput käyttävät ulkoilmaa lämmönlähteenä ja siirtävät lämmön kiinteistön lämmitysvesijärjestelmiin. Toteutettuja laitoksia on maassamme jonkin verran, mutta kattavaa vuoden kestävästä seurantamittausta ei tietojemme mukaan ole tehty missään. Ulkoilmaan lämmönlähteenä kohdistuu huomattavaa mielenkiintoa, koska se voidaan nähdä vaihtoehtona maalämmölle. Suurten kohteiden maalämpökohteissa joudutaan tyypillisesti poraamaan kallioon yhteensä satoja metrejä reikää lämmönlähteeksi. Tämä on merkittävä kustannus ja työläs projektin vaihe. Vallitsevan käsityksen mukaan maalämpöjärjestelmien lämpökerroin on selvästi ulkoilmajärjestelmiä korkeampi, mutta vastaavasti ulkoilmajärjestelmissä vältytään lämpökaivojen poraamiselta ja kaikki lämpöpumpun tekniikka tulee yhtenä pakettina rakennuksen ulkoseinustalle. Tämän tutkimushankkeen tarkoituksena on selvittää kattavien mittausten avulla laitoksen toiminta vuoden kestävästä mittausjakson aikana. Mittaus toteutettiin asentamalla järjestelmään noin 100 lämpötila-, virtaus- ja virta-anturia. Anturien lukemat tallennettiin minuutin välein palvelimelle. Tämän tietomassan analyysiin perustuvat esitetyt tulokset.

Tutkimuksen kohteena oli pienehkö kerrostalo, jossa on kolme NIBE:n F 2100-sarjan suurinta F 2120 ulkoyksikköä. Kiinteistöön syötettiin mittausjakson aikana ulkoyksikköiltä lämpöä 155 083 kWh. Tästä 111 326 kWh on peräisin ulkoilmasta ja 53 338 kWh on sähköä. Tuotetusta lämmöstä lämpöpumpujen höyrystinpatterien sulatukseen ja lämpöhäviöihin ulkona kului 9 778 kWh. Lämpimän käyttöveden tuottamiseen käytettiin 53 551 kWh, josta käyttövesijärjestelmän häviöihin kului 4507 kWh. Kiinteistön lämmitysjärjestelmään käytettiin 101 305 kWh eli yhteensä 154 856 kWh. Ero tuotetun ja käytetyn välillä muodostuu järjestelmän häviöistä.

Pääasiassa lämmönjakohuoneessa tapahtuvat järjestelmän lämpöhäviöt olivat 5026 kWh. Tässä luvussa ei ole mukana lämmönjaon eikä lämpimän käyttöveden kiertojohtoon häviöitä. Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon häviöt sisältyvät käyttöveden lämmityksen lukuihin.

Järjestelmä toimii niin, että silloin kun lämpöpumput eivät kykene ylläpitämään vaadittua lämpötilatasoa, kytkeytyvät sähkökattilat avuksi. Sähkökattiloiden ja vastusten kulutus mittausjakson aikana oli 9 581 kWh. Kun tarkastellaan prosenttiosuuksia, nähdään että käyttöveden osuus kokonaislämmöntarpeesta oli 33 % ja kiinteistön lämmityksen 67 %. Sähköstä sähkökattiloissa ja vastuksissa käytettiin 18 % ja lämpöpumpuissa 82 %. Sulatuksen ja ulkoyksikön lämpöhäviöiden osuus oli vuositasolla 6 % lämpöpumpun tuottamasta kokonaislämpömäärästä 155 083 kWh.

Pääasiassa käyttövetä tuottavan lämpöpumpun vuosilämpökerroin oli 2,8 ja pääasiassa kiinteistön lämmitystä palvelevien noin 3,8. Luvuissa on huomioitu sulatukset ja ulkoiset lämpöhäviöt. Jakamalla järjestelmään syötetty lämpömäärä sen tuottamiseen tarvittavan sähkön määrällä, saadaan koko laitoksen lämpökertoimeksi 2,8. Näin kiinteistössä käytetyn lämmön hinta/kWh, on sähkön hinta jaettuna lämpökertoimella 2,8.

Järjestelmällä oli vaikeuksia saavuttaa vaadittuja käyttöveden lämpötilatasoja. Pysyvästi alhainen lämpötila voi aiheuttaa haitallista bakteerikasvustoa. Tästä seuraa selvä terveysriski. Tähän ongelmaan on syytä välittömästi puuttua.

Lämpöpumpun lauhtumislämpötila ja myös lämpökerroin riippuvat täysin siitä vesijärjestelmästä, johon se on kytketty. Vesijärjestelmä on suunniteltu niin monimutkaiseksi, että se on herkkä pienillekin asennuksen virheille ja komponenttien häiriöille. Käytettyjen komponenttien laatuun tulisi kiinnittää erityistä huomiota, koska nyt käytetyissä yksisuuntaventtiileissä ja vaihtoventtiilissä on merkittäviä vuotoja. Vesivirtaukset järjestelmässä eivät aina olleet suunnitelman mukaisia. Tutkimusryhmän käsityksen mukaan vesijärjestelmän yksinkertaistamisessa ja kehittämisessä on tarjolla potentiaalia nykyisten lämpöpumpujen vuosilämpökertoimen nostoon.

# Lähteet

---

Azizi S. & Pérez L. C. Novel defrost techniques on air source heat pumps. Master of Science Thesis, KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology.

<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:968954/FULLTEXT01.pdf> (viitattu 26.8.2023)

Elomäki, A. 2022. Ilma-vesilämpöpumpun sulatusenergian määrittäminen, opinnäytetyö. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/750692/Elomaki\\_Aleksi.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/750692/Elomaki_Aleksi.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Janusevicius and Streckniene. Analysis of air-to-water heat pump in cold climate: comparison between experiment and simulation. Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania.

Kuopila, V. 2022. Ultraäänitoimiset energiamittarit lämmitysjärjestelmän suorituskyvyn mittaamisessa, opinnäytetyö. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/752505/Kuopila\\_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/752505/Kuopila_Ville.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Liu, S.G., Han, Z.T., Zhou, C., Li, X. & Yao, Y. (2011). Study of energy consumption of air source heat pump defrost. 7th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning - Proceedings of ISH-VAC 2011. 3. 880-886.

[https://www.researchgate.net/publication/286675855\\_Study\\_of\\_energy\\_consumption\\_of\\_air\\_source\\_heat\\_pump\\_defrost](https://www.researchgate.net/publication/286675855_Study_of_energy_consumption_of_air_source_heat_pump_defrost) (viitattu 26.8.2023)

Nibe, asentajan käsikirja, IHB FI 2214-1, (viitattu 26.8.2023).

Rossi di Schio Eugenia, Ballerini Vincenzo, Matteo Dongellini and Valdiserri Paolo. Defrosting of Air-Source Heat Pumps: Effect of Real Temperature Data on Seasonal Energy Performance for Different Locations in Italy.

<https://cris.unibo.it/retrieve/e1dcb338-3a0a-7715-e053-1705fe0a6cc9/applsci-11-08003-v2.pdf> (viitattu 26.8.2023)

Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriö. 2015, Asumisterveysasetus § 7, Vesijohtoveden lämpötila.

Säker Vatten, Branschregler, Säker Vatteninstallation 2016:1-4.11, <https://www.sakervatten.se/branchregler/online/4/1> (viitattu 26.8.2023)

Talotekniikka Info, <https://talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/6-veden-lampotila>

Vainio, J. 2022. Kiinteistöautomaation mittausjärjestelmän suunnittelu ja toteutus, opinnäytetyö. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/785559/Vainio\\_Juho.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/785559/Vainio_Juho.pdf?sequence=6&isAllowed=y)

Vocalea P., Morinib G.L. & Spiga M. 2013. Influence of outdoor air conditions on the air source heat pumps performance. [https://www.researchgate.net/figure/Influence-of-RH-value-on-the-monthly-average-value-of-the-COP-a-Bologna-b-Bolzano\\_fig4\\_261705318](https://www.researchgate.net/figure/Influence-of-RH-value-on-the-monthly-average-value-of-the-COP-a-Bologna-b-Bolzano_fig4_261705318) (viitattu 30.8.2023)