



Jukka Pesonen

Rakennusten lämpöpumppulaitosten toiminta ja lämmöntuotannon vihreä siirtymä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

30.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Jukka Pesonen
Otsikko:	Rakennusten lämpöpumppulaitosten toiminta ja lämmön- tuotannon vihreä siirtymä
Sivumäärä:	81 sivua + 8 liitettä
Aika:	30.5.2025
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Kestävä kehitys
Ohjaajat:	Liiketoimintajohtaja Arto Hakkarainen Yliopettaja Rauno Holopainen

Tässä insinööriyössä tarkasteltiin rakennusten lämpöpumppulaitosten toimintaa ja niiden roolia lämmön tuotannon vihreässä siirtymässä. Tarkemmin tutkittiin ilma-vesi-lämpöpumppujen (IVLP) ja poistoilmalämpöpumppujen (PILP) soveltuvuutta kaukolämmön rinnalle rakennettavissa hybridijärjestelmissä.

Työn tavoitteena oli selvittää lämpöpumppulaitosten todellinen suorituskyky kenttämittausten avulla, arvioida järjestelmien suunnittelun, mitoituksen ja käytön onnistumista sekä kehittää menetelmiä suunnittelun ja käytön seurannan tueksi. Kenttämitaukset toteutettiin kahdeksassa PILP-järjestelmällä ja 14 IVLP-järjestelmällä varustetussa asuinalueella. Lisäksi tutkimusta varten kehitettiin Excel-pohjaisia simulointityökaluja mitoituksen tueksi sekä toiminnan arviointiin.

Kenttätutkimusten tuloksia vertailtiin aiempiin tutkimuksiin sekä valmistajien ilmoittamiin hyötysuhteisiin, jotka oli määritetty EN 14511 -standardin mukaisissa testiolosuhteissa. PILP-järjestelmien keskimääräinen SCOP-arvo oli 3,56. IVLP-järjestelmien toteutunut SCOP oli keskimäärin 1,8, mikä oli noin 24 % vähemmän kuin valmistajien ilmoittamat arvot standardiolosuhteissa. IVLP-järjestelmissä lämpöpumpulla tuotetun nesteen lämpötila sekä Monoblock-tyyppisten laitteistojen siirtohäviöt osoittautuivat merkittäviksi ja ne tulee arvioida tapauskohtaisesti kiinteistökohtaisen simuloinnin avulla.

Johtopäätöksenä on, että laitteiden valmistajien ilmoittamat suoritusarvot eivät usein vastaa todellisia käyttöolosuhteita, ja järjestelmien suunnittelussa sekä käyttöönotossa tarvitaan kokonaisvaltaista järjestelmäosaamista. Lämpöpumppujen suorituskyvyn varmistamiseksi on tärkeää optimoida mitoitus, kytkennät ja käyttöolosuhteet kohdekohtaisesti. Työn tuloksia ja kehitettyjä laskentatyökaluja voidaan hyödyntää lämpöpumppujärjestelmien mitoituksessa, investointien kannattavuuden arvioinnissa sekä energiankäytön tehostamisessa.

Avainsanat: Lämpöpumppu, energiaremontti, kaukolämpö, vihreä siirtymä, ilma-vesilämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu, IVLP, PILP, hybridikytkentä, SCOP, COP

Abstract

Author: Jukka Pesonen
Title: Operation of Heat Pumps in Buildings and Green Transition of Heat Production
Number of Pages: 81 pages + 8 appendices
Date: 30 May 2025

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Supervisors: Arto Hakkarainen, Business Director
Rauno Holopainen, Principal Lecturer

The thesis aimed at evaluating the actual performance of building heat pump installations and to assess their role in the green transition of heat production. The study focused on the integration of air-to-water heat pumps (AWHP) and exhaust air heat pumps (EAHP) into hybrid heating systems alongside district heating.

Measurements were taken in eight residential buildings equipped with EAHPs and fourteen buildings with AWHP systems. The system performance was analyzed based on real operational data. Additionally, Excel-based simulation tools were developed to support the dimensioning and performance evaluation of the systems.

The results showed that the average seasonal coefficient of performance (SCOP) for EAHP systems was 3.56, while AWHP systems reached an average of 1.8 approximately 24 % lower than the manufacturers' reported values under standard testing conditions. Factors such as heat losses in monoblock configurations and the required supply temperatures had a significant impact and must be evaluated on a case-by-case basis.

The project highlighted the gap between theoretical and real-world performance, emphasizing the importance of system-level expertise in design, implementation, and commissioning. The findings and created tools can be used to improve the dimensioning of heat pump systems, assess investment feasibility, and enhance energy efficiency in residential buildings.

Keywords: heat pump, energy renovation, district heating, green transition, air-to-water heat pump, exhaust air heat pump, hybrid connection, SCOP, COP

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	8
2	Tavoitteet ja rajaus	9
2.1	Ilmastonmuutos ja sen torjuminen	9
2.2	Rakennusten energian kulutus	11
2.3	Kaukolämpöenergiayhtiöt	12
2.4	Lämpöpumpput ja järjestelmät	14
2.5	Julkaistuja tutkimuksia lämpöpumpuista	17
3	Energian hinta ja siirtymä fossiilisista polttoaineista	18
3.1	Kaukolämpö	18
3.1.1	Päästökehityksen vaikutus tuotantoratkaisuihin	18
3.1.2	Nykytilanne ja muutos vuoteen 2030	19
3.1.3	Lämpöpumput ja arvioitu hyötysuhde	22
3.2	Sähkön hinta ja eskalaatio vuodelle 2035	22
4	Lämpöpumpun toiminta	24
4.1	Lämpöpumpun teoriaa	24
4.2	Toimintaperiaate	25
4.3	Log p,h -tilapiirros	27
4.4	Hyötysuhde, COP	29
5	Poistoilman lämmöntalteenoton toteutettavuuslaskuri	30
5.1	Tavoite	30
5.2	Toimintaperiaate	30
5.3	Soveltuvuus	31
5.4	Koneellinen poistoilmanvaihto asuinkerrostaloissa	32
5.5	Tutkittavat PILP-kohteet	33
5.5.1	Kohdetiedot	33
5.5.2	Tutkimuksen kohdekohtaiset lämpökertoimet	34
5.5.3	Vertaistutkimukset ja SCOP-arvot	37
5.5.4	Tutkimusten yhteenveto	39
5.6	Poistoilmasta saatava energiateho	39

5.6.1	PILP-esimerkkikohde	43
5.6.2	PILP-järjestelmän energiaperito	45
5.6.3	PILP-energiaperitolaskuri	45
5.6.4	PILP-järjestelmien energiansäästöpotentiaali	47
6	Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmien toiminnan tarkastelu	48
6.1	Toimintaperiaate	48
6.2	Tutkittavat kohteet ja kohdetiedot	48
6.3	Energiatehokkuusselvitys	50
6.4	Energiahankesuunnitelma	50
6.4.1	Ilma-vesilämpöpumppujen asennus- ja toimintavaatimukset	50
6.4.2	Laitteistomitoitus	52
6.4.3	Periaatteellinen kytkentäkaavio	53
6.5	Toteutussuunnittelu ja urakan kytkentäkaavio	55
6.6	Ohjeavot lämpöperitolle ja SCOP-arvolle	56
6.7	Täyden tehon mitoitus	57
6.8	Valitut Ilma-vesilämpöpumput ja laitevalmistajan tiedot	58
6.9	Toiminnan tutkiminen	59
6.10	Toteutunut lämpöperito ja teho	61
6.11	Järjestelmän tarkastus	62
6.11.1	Ilma-vesilämpöpumppujen käyttöönotto	62
6.11.2	Ilma-vesilämpöpumppujen toiminta	62
6.11.3	Lämpökerroinvertailu	67
6.11.4	Tutkittu IVLP-lämpökerroin	68
6.11.5	Lämpöpumppujen tehomitoitus	69
6.11.6	IVLP toiminnan simulointi	71
6.11.7	Lämpöpumpun valinta	73
7	Johtopäätökset	74
8	Yhteenveto	75
	Lähteet	78
	Liitteet	
	Liite 1: Pilp-järjestelmän tehontuoton laskentakaavat	
	Liite 2: Kytkentäkaavio, vesi-ilmalämpöpumppu	
	Liite 3: COP ja lämpöperito tammi-joulukuussa 2023	

Liite 4: Ideaalikiertoprosessi Cool Pack,

Liite 5: Swegon ZETA REV HP XT tuote-esiteen tekniset tiedot

Liite 6: Rakennusten lämmitysmuodot Suomessa vuonna 2023

Liite 7: Lämmitysmuodon optimoinnin tulokset

Liite 8: IVLP käyttöönottotarkastuspöytäkirjojen yhteenveto

Lyhenteet

COP: *Coefficient of Performance*. Lämpöpumpun hetkellinen hyötysuhdeluku (engl.). Luku on hetkellisen lämpöenergian ja kuluneen sähköenergian suhde.

ExHP: *Exhaust Heat Pump*. Poistoilmalämpöpumppu.

GSHP: *Ground Source Heat Pump*. Maalämpöpumppu.

IEA: *International Energy Agency*. Kansainvälinen energiajärjestö.

Monoblock: *Monoblock*-tyyppisissä ilma-vesilämpöpumpuissa lämmitysverkoston neste kiertää ulkoyksikössä. Asennuksessa ei tehdä kylmäasennustöitä.

NZE: *Net Zero Emissions*. Hiilineutraali.

RH: *Relative Humidity*, ilman suhteellinen kosteus

SCOP: *Seasonal Coefficient of Performance*. Lämpöpumpun kausittainen hyötysuhdeluku (engl.). Luku on kausittaisen lämpöenergian ja kuluneen sähköenergian suhde.

SPF: *Seasonal Performance Factor*. Lämpöpumpun kausisuorituskykykerroin. Luku on lämpöpumpulla tuotetun vuotuisen energian suhde lämpöpumpun sekä apulaitteiden vuotuiseseen sähkönkulutukseen.

SPLIT: *Split*-tyyppisessä ilma-vesilämpöpumpussa ulko- ja sisäyksiköiden välillä kiertää kylmäaine. Kylmäainepiirin asennustyöt edellyttävät kylmäasentajan pätevyyttä.

1 Johdanto

Tämän YAMK-opinnäytetyön aiheena on rakennusten lämpöpumppulaitosten toiminta ja lämmöntuotannon vihreä siirtymä. Työssä tarkastellaan ilma-vesi-lämpöpumppujen (IVLP) ja poistoilmalämpöpumppujen (PILP) toimintaa, energiatehokkuutta sekä kannattavuutta osana rakennusten kaukolämpöhybridijärjestelmiä. Kokonaiskuvan muodostamiseksi perehdytään myös kaukolämpö-energian tuotantotapoihin yleisellä tasolla, joka mahdollistaa lämpöpumppujen roolin ja kannattavuuden tarkastelun osana koko lämmöntuotantojärjestelmää.

Lämpöpumppujen käyttö lisääntyy energiayhtiöiden siirtyessä fossiilisista polttoaineista ympäristöystävällisempiin vaihtoehtoihin. Rakennuskohtaiset järjestelmät ovat yhä monimutkaisempia, ja niiden käyttö sekä toiminnan seuranta edellyttävät yhä enemmän asiantuntemusta. Tästä tulee tarve syvälliselle, kenttämittauksiin perustavalle tutkimukselle järjestelmien toiminnasta todellisissa käyttöolosuhteissa. Useissa tapauksissa järjestelmien toiminta ei ole vastannut tilaajan odotuksia. Rambollin selvityksen mukaan peräti 43 %:ssa lämpöpumppukohteista oli ongelmia, mikä on heikentänyt energiansäästöjä ja investointien kannattavuutta [1].

Työn tavoitteena on selvittää lämpöpumppulaitosten todellista suorituskykyä kenttämittausten avulla ja arvioida järjestelmien suunnittelun, mitoituksen ja käytön onnistumista. Lisäksi työssä kehitetään laskentatyökaluja rakennusten lämpöpumppulaitosten toiminnan simulointia varten ja esitetään järjestelmäkohdaisia parannusehdotuksia. Näiden avulla tavoitteena on parantaa tulevien investointien kannattavuusarvioiden luotettavuutta ja hyödyntää olemassa olevaa tietoa laajemmin energiaremonttien suunnittelussa sekä käyttöönotossa. Lisäksi laskureiden avulla pystytään arvioimaan käytössä olevien järjestelmien toimintaa suhteessa vastaaviin laitoksiin.

Työssä perehdytään lämpöpumppuista tehtyihin artikkeleihin, tutkimuksiin, lopputöihin, julkaisuihin, asetuksiin, laskentaohjeisiin ja hiilineutraaliustavoitteisiin.

Aikaisempien tutkimuksien tuloksia verrataan kenttäkokeiden tuloksiin. Tutkimuksessa vertaillaan ja tutkitaan lämpöpumppujen hyötysuhteita, energiapaitoja ja toimintaa. Tutkimus on kvalitatiivinen.

Lähdekirjallisuuden perustana ovat kansalliset ympäristöministeriön asetukset sekä Rakennustieto Ry:n ylläpitämä RT-kortisto. Kansainvälisiä tutkimuksia tarkastellaan artikkeleiden kautta, joihin on tiivistetty laajempien tutkimusten tulokset. Eri yleishyödylliset järjestöt ja yhdistykset ovat myös julkaisseet merkittävästi aiheeseen liittyvää materiaalia. Tilastotietojen hakulähteinä käytettiin Tilastokeskuksen tietokantoja ja kaukolämmön osalta Energiateollisuus ry:n aineistoja.

Kenttäkohteina ovat pääkaupunkiseudulla sijaitsevat kahdeksan asuinrakennusta, joihin on asennettu poistoilmalämpöpumppujärjestelmät ja kaukolämpö on primäärisenä lämmitysmuotona. Kohteista on kerätty mittaustiedot Fiksu - etähallintajärjestelmästä kuukausitasolla ajanjaksolta 9/2021–9/2022. Kohteet on rakennettu vuosina 1960–2002.

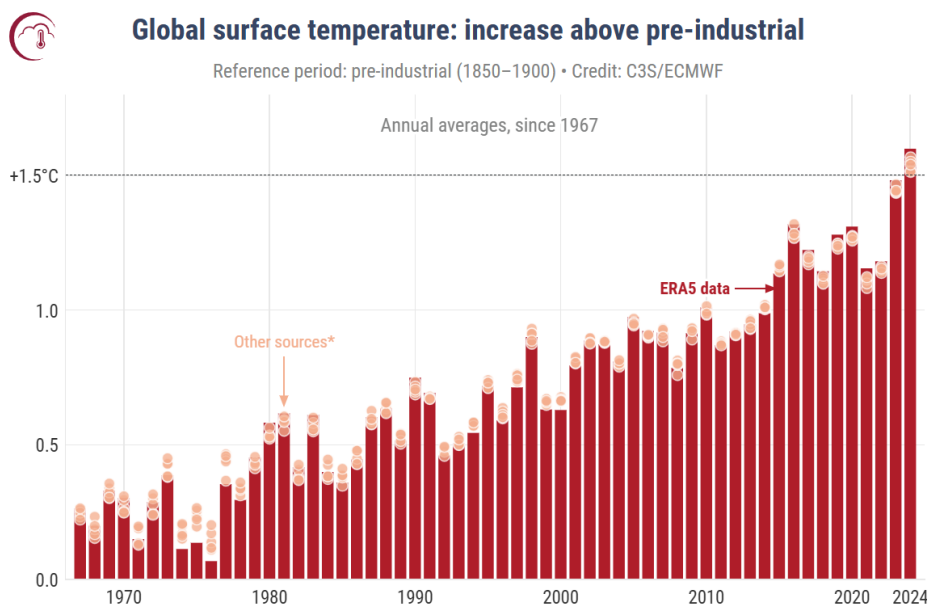
Ilma-vesilämpöpumppujen kenttäkohteina on 14 erillistä hybridilämmitysrakennusta, joissa kaukolämpö on primäärilämmityksenä. Kohteissa on käytössä Deos-etähallintajärjestelmä.

2 Tavoitteet ja raja

2.1 Ilmastomuutos ja sen torjuminen

Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteena on torjua ilmastomuutos ja poistaa köyhyyttä. Sopimuksen keskeinen päämäärä on pitää maapallon keskilämpötilan nousu selvästi alle 2 °C:ssa suhteessa esiteolliseen aikaan. Tavoitteena on rajata lämpötilan nousu 1,5 °C:seen. Tämän toteutuminen vähentäisi merkittävästi ilmastomuutoksen aiheuttamia riskejä ja vaikutuksia. Sopimuksessa sitoudutaan edistämään kehitystä alhaisiin kasvihuonepäästöihin keinoilla, jotka eivät uhkaa ruuan tuotantoa. [2; 3.] Energiankäyttöä ja -tuotantoa on tehostettava

sekä muutettava vähäpäästöisemmäksi, jotta tavoitteet on mahdollista saavuttaa tai vähintään rajata lämpötilan nousu mahdollisimman pieniksi. Kuvassa 1 on esitetty globaalin keskilämpötilan muutos suhteessa esiteolliseen aikaan. Vuosi 2024 oli mittaushistoria lämpimin ja raja-arvo 1,5 °C ylittyi ensimmäisen kerran. Keskilämpötiloissa on merkittäviä eroja mittausvuosien kesken, vaikka trendin on nouseva.

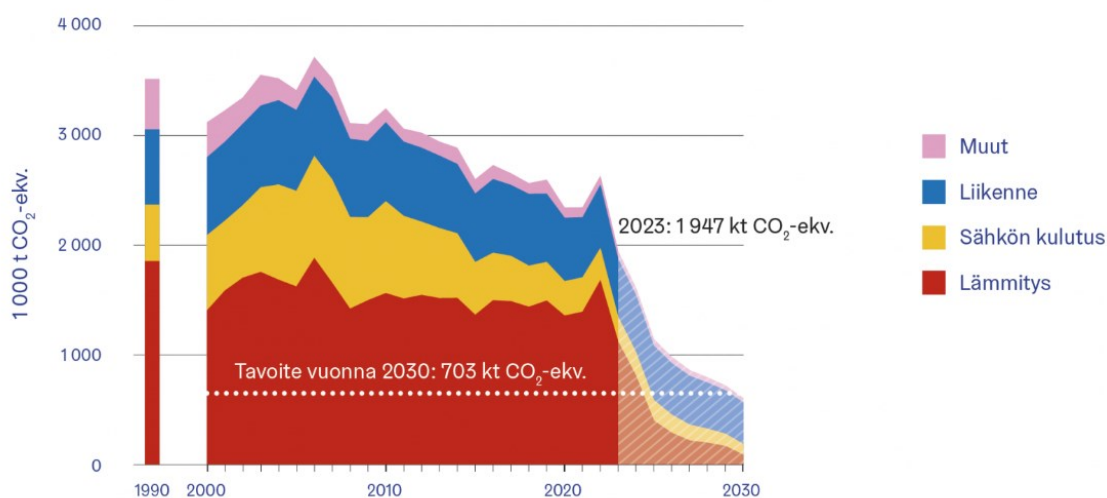


Kuva 1. Keskilämpötilan muutos suhteessa esiteolliseen aikaan. Keskiarvo vuodesta 1967 lähtien [4].

Suomen kansallinen ilmastolaki (423/2022) tuli voimaan heinäkuussa 2022, ja se asettaa päästövähennystavoitteet vuosille 2030, 2040 ja 2050. Laissa on määritetty, että Suomen on oltava hiilineutraali viimeistään vuonna 2035. [5, § 1.] Lain tavoitteena on varmistaa ilmastotoimien oikeudenmukaisuus ja kestävä kehitys [5, § 2].

Pääkaupunkiseudulla Helsinki, Vantaa ja Espoo ovat asettaneet tavoitteeksi olla hiilineutraaleja vuonna 2030. Kaikkien kaupunkien hiilineutraaliustavoitteena on, että vertailuvuoden 1990 suorista kasvihuonepäästöistä leikataan vähintään 80 % ja loput (enintään 20 %) voidaan kompensoida. [6, s. 4; 7; 8, s. 9.]

Helsingin kaupungin lämmityksen ja sähkön kulutuksen hiilidioksidipäästöt vuodesta 1990 alkaen ja ennuste vuoteen 2030 asti on esitetty kuvassa 2 [9].



Lähde: HSY

Kuva 2. Helsingin kokonaispäästöt sektoreittain vuosina 1990 ja 2000–2023 sekä ennuste vuosille 2024–2030 [9].

2.2 Rakennusten energian kulutus

Rakennukset käyttävät EU:ssa 40 % energiasta ja tuottavat 36 % energiaan liittyvistä kasvihuonekaasupäästöistä [10]. Suomessa 2023 rakennustenlämmityksen osuus kokonaisenergiakulutuksesta on noin 28 % (278 036 TJ) [11]. Helsingissä suorista päästöistä 64 % syntyy lämmityksestä, josta kaukolämmön osuus on 96 %. Kaukolämpöenergiatuotannon päästöjen vähentämisellä saadaan suurin vaikutus kokonaispäästöihin. [12, s. 4.] Helsingissä rakennusten kokonaislämmitystarve oli noin 7 TWh vuonna 2019. Korjausrakentamisella on arvioitu olevan 15 % vähentämispotentialiaali hiilidioksidipäästöihin vuoteen 2030 mennessä. Vastaava säästö on arvioitu saavutettavan siirtymällä kiinteistökohtaiseen maalämmön käyttöön. [12, s. 48; s. 14.]

2.3 Kaukolämpöenergiayhtiöt

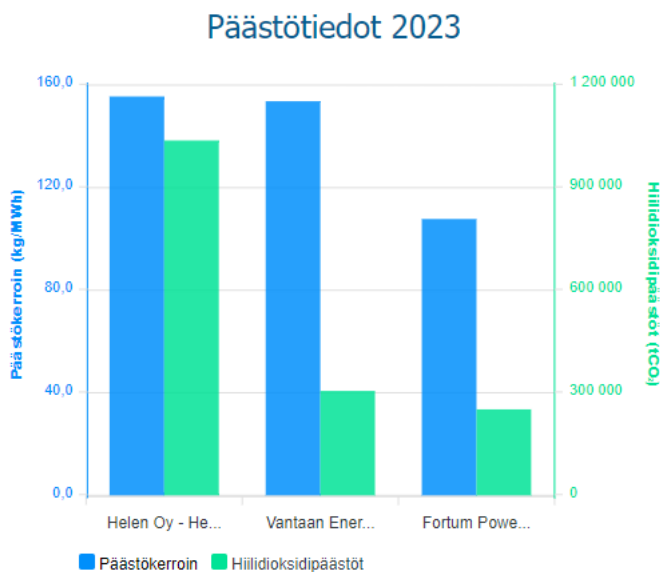
Pääkaupunkiseudulla toimii kolme kaukolämpöenergiayhtiötä, Helen Oyj (Helsinki), Vantaan Energia Oyj ja Fortum Oyj (Espoo). Ne ovat toisistaan riippumattomia energiantuottajia, joiden palvelualueet määrittyvät kaupungin rajojen mukaisesti. Fortum on pörssiyhtiö, jonka suurimpana omistajana on Valtioneuvoston kanslia (51 %) [13]. Vantaan Energian pääomistajina ovat Vantaan kaupunki (60 %) ja Helsingin kaupunki (40 %). [14, s. 23.]

Päästövähennystavoitteisiin pääseminen ja niissä pysyminen vaatii merkittäviä muutoksia energiantuotannossa. Fossiilisista polttoaineista joudutaan siirtymään uusiutuviin polttoaineisiin ja sähköön. Ympäristöministeriön toimeksianosta Suomen ympäristökeskus Syke on kehittänyt ja ylläpitää rakennusten energian kulutuksen CO₂-ominaispäästöjen tilastointia ja arviointia vuosille 2020–2120. Biomassan polttamisen CO₂-päästöt on arvioitu nollassa EU:n uusiutuvien energialähteiden kestävyyskriteeristön mukaisesti. [15, s. 4.]

Kuvassa 3 on esitetty pääkaupunkiseudun energiayhtiöiden päästötiedot vuodelta 2023. Fortumin lämmöntuotannon päästökerroin 2023 on Espoossa 108 kg CO₂/MWh, joka pienempi kuin Vantaan Energialla ja Helenillä. Kuvan 6 energialähdejakaumassa Fortumilla on tällä hetkellä Espoossa muuhun pääkaupunkiseutuun nähden enemmän lämmöntalteenottoa tai lämpöpumpputuotantoa (24,5 %). Fortum on panostanut myös uusiutuviin energialähteisiin. Fossiilisten polttoaineiden osuus on tällä hetkellä 36,7 %. [16.]

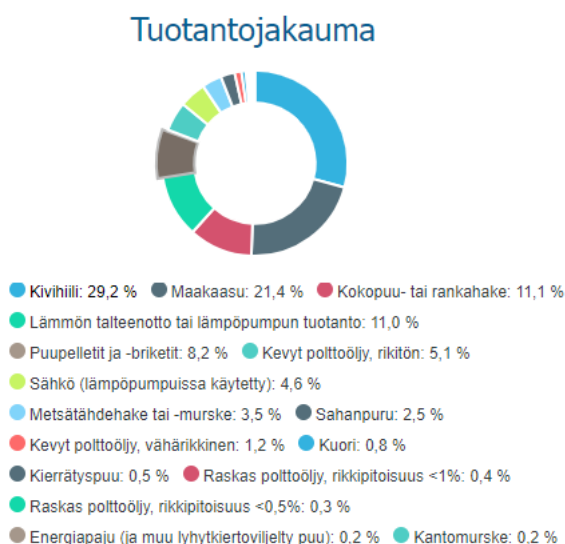
Vantaan Energian lämmöntuotannon päästökerroin on 154 kg CO₂/MWh. Vantaalla yhdyskuntajätteen käytön osuus on suuri (59,5 %) lämmöntuotannossa. Fossiilisten polttoaineiden osuus on 16,5 %. Päästökertoimen pienentäminen edellyttää investointeja vähähiilisiin energialähteisiin. [16.]

Helenin päästökerroin on 156 kg CO₂/MWh, mikä edellyttää merkittäviä investointeja puhtaampiin energialähteisiin sekä energiatehokkuustoimenpiteisiin. Fossiilisten polttoaineiden osuus oli 50,6 % vuonna 2023. Kivihiilen käyttö lopui Salmisaaren voimalaitoksella vuoden 2025 huhtikuussa. [16.]

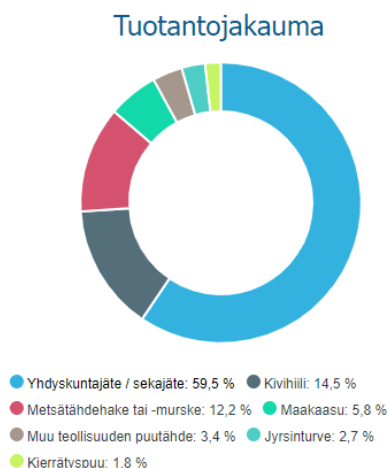


Kuva 3. Pääkaupunkiseudun energiayhtiöiden hiilidioksidipäästöt ja päästökerroimet ja hiilidioksidipäästöt vuonna 2023. Päästötietojen arvioinnissa on käytetty hyödynjakomenetelmää. [16.]

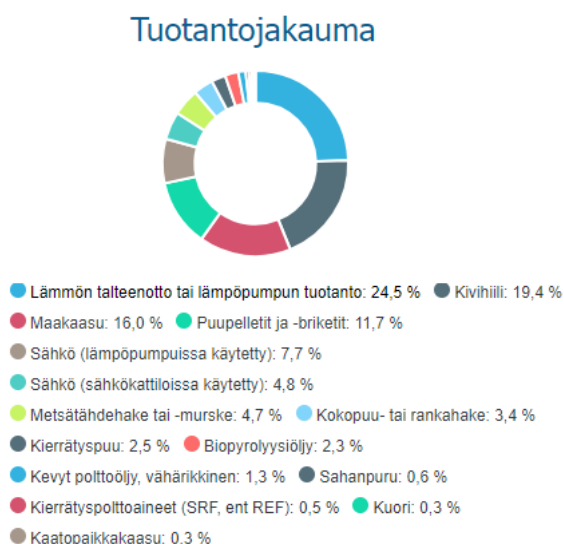
Kuvissa 4–6 on esitetty vuoden 2023 tuotantojakaumat hyödynjakomenetelmällä energiayhtiökohtaisesti.



Kuva 4. Helenin lämmöntuotannon energialähdejakauma 2023 [16].



Kuva 5. Vantaan lämmöntuotannon energialähdejakauma 2023 [16].



Kuva 6. Fortumin lämmöntuotannon energialähdejakauma 2023 [16].

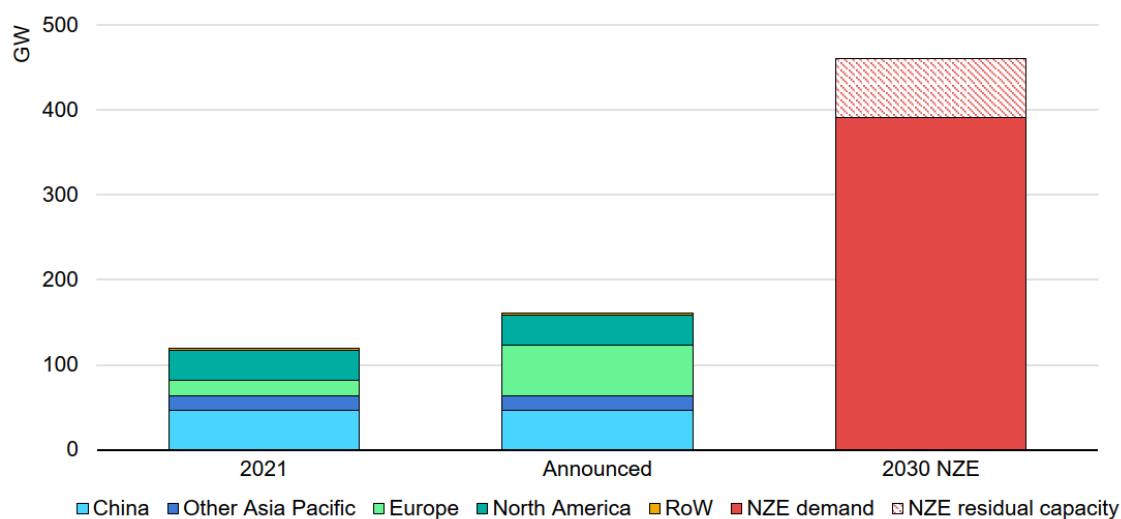
2.4 Lämpöpumppujärjestelmät

IEA:n Energiateknologian tulevaisuus -raportin 2023 (ETP-2023) mukaan energiantuotanto on uuden teollisen aikakauden alkuvaiheessa -puhtaan energian valmistuksen teknologiamurrossa. Lämpöpumput ovat osana muutosta kohti vihreää siirtymää. [16, s. 20.] Kehityksestä huolimatta fossiilisten polttoaineiden osuus on primäärienergiankäytöstä noin 80 % [17, s. 36].

Globaalin lämpöpumppukapasiteetin on lähes nelinkertaistuttava 2030 mennessä, jotta Pariisin ilmastopimuksien NZE-tavoitteissa pysytään. Vuotuinen lämpöpumpuilla tuotettu energiamäärä täytyy nousta maailmanlaajuisesti noin 120 GWth:stä noin 460 GWth:iin. Nykyisen valmistuskapasiteetin ja tiedossa olevan laajennussuunnitelmien perusteella tavoitteesta jäädään kauas. Vuonna 2021 lämpöpumput kattoivat alle 10 % maailmanlaajuisesta lämmitystarpeesta. [18, s. 238–239.]

Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi kaksinkertaistaa lämpöpumppujen määrän 2022–2030 välisenä aikana. Tämä tarkoittaa noin 30 miljoonan uuden lämpöpumpun asentamista EU:n alueella. [17, s. 242.]

Kuvassa 7 nähdään ero nykyisen ja tarvittavan tuotantokapasiteetin välillä, mikä tarvitaan hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi.

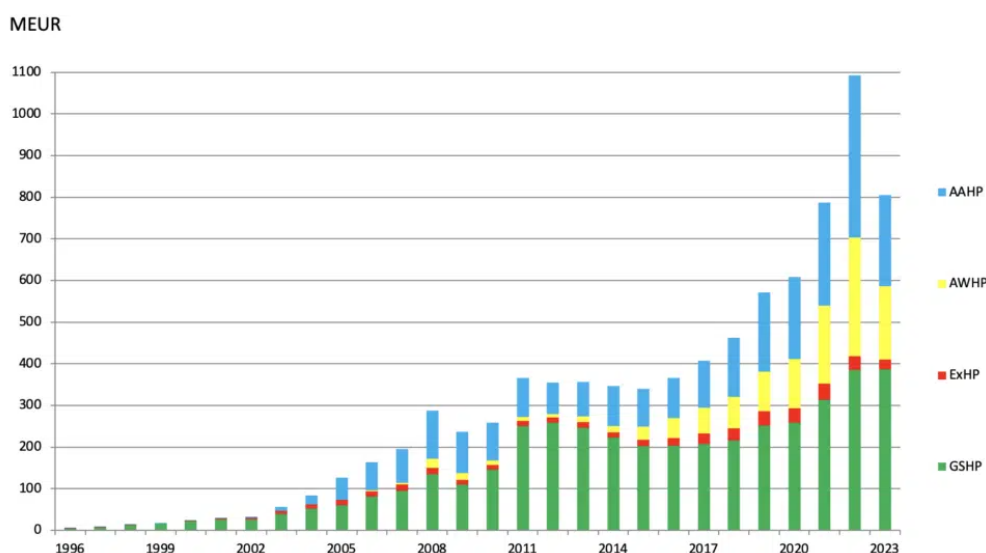


Kuva 7. Lämpöpumppujen valmistuskapasiteettista maittain/markkina-alueittain ilmoitettujen hankkeiden ja NZE-skenaarion 2030/2050 mukaisesti. Valmistuskapasiteetin hyötysuhteeksi on oletettu 85 %. Lämpöpumppukapasiteetti (GW) on ilmoitettu lämpötehona. RoW=Rest of World, NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario. [17, s. 239.]

Suomessa lämpöpumppumarkkinat ovat kasvaneet nopeasti 2000-luvun alusta lähtien. Maalämpöjärjestelmien (GSHP) osuus on noin puolet lämpöpumppumarkkinasta. Poistoilmalämpöpumppujen (ExHP) markkinaosuus on noin 2–3

%. Merkittävää kasvua ei ollut viime vuosina. Ilmavesilämpöpumppujärjestelmät ovat yleistyneet viimeisen 10 vuoden aikana ja oletettavasti ne vieneet markkinaosuutta maalämmöltä edullisempien perustamiskustannuksien ja lämpökaivojen peruskierroalueiden vuoksi. Ilmalämpöpumppujen markkinan ennustetaan kasvavan nopeimmin pienimmän investointikustannuksen vuoksi. Lämpöpumppumarkkina on Suomessa noin 800 miljoonaa euroa. [18.]

Kuvassa 8 on esitetty lämpöpumppuinvestoinnit Suomessa vuosina 1996–2023 pumpputyypeittäin. Maalämpöpumppujen (GSHP) osuus oli vuonna 2023 arviolta 48 %, ilmalämpöpumppujen (AAHP) 26 %, ilma-vesilämpöpumppujen (AWHP) 21 % ja poistoilmalämpöpumppujen (ExHP) 4 %. Kokonaisinvestoinnit olivat noin 800 miljoonaa euroa.



Kuva 8. Lämpöpumppumarkkina Suomessa vuosina 1996–2023 [18].

Lämmitysmuodot rakennustyypeittäin on esitetty liitteessä 6. Sähkö on yleisin lämmitysmuoto. Maalämmön osuus 6,5 % (94 587) rakennuskannasta. Maalämpö on asuinrakennuksissa lämmitysmuotona 7 %:ssa (81 992) omakoti- ja paritaloista, 6 %:ssa (5 103) rivitaloista ja 3,9 %:ssa kerrostaloista. Tilastossa eivät ole mukana tukilämmönlähteenä olevat lämpöpumppuratkaisut, kuten ilma- ja ilmavesilämpöpumput.

2.5 Julkaistuja tutkimuksia lämpöpumpuista

Kansalliskirjastosta vanhimmat asiaa käsittelevät teokset ovat ”Lämpöpumppu ja sen hyväksikäyttö”, (256 sivua) vuodelta 1974 ja VTT:n tutkimus vuodelta 1975 ”Lämpöpumpun käyttö rakennuksen lämmitykseen”. Lämpöpumppujen toimintaperiaatetta, käyttösovelluksia lämmitykseen ja käytönaikaista toimintaa on tutkittu perusteellisesti. Lämpöpumppujen toimintaperiaate on varsin yksinkertainen, toiminta ja hyötysuhteet (COP-arvot) käytössä olevilla kylmäaineilla ovat tiedossa riittävällä tarkkuudella suunnittelun ja kannattavuuslaskelmien tarpeisiin. Työssä keskitytään poistoilmalämpöpumppujen tekniseen toimivuuteen ja soveltuvuuteen asuinkerrostaloihin sekä ilma-vesilämpöpumppujen toimintaan, käytönaikaiseen suorituskykyyn ja oikeaan laitevalintaan. Tutkimuskohteissa on primäärilämmitysmuotona kaukolämpö.

Hybridilämmitysjärjestelmä yhdistää kaukolämmön ja lämpöpumpun ominaisuudet. Energiaa tehdään kiinteistölle kaukolämmöllä ja lämpöpumpulla, eli sähköllä. Muuttujia tulee lisää kaukolämpöön verrattuna. Poistoilmahybridiratkaisuista löytyy useita tutkimuksia ja ohjeistuksia, kuten RT-kortit ja VTT:n selvitys [20; 21; 22; 23]. Hyötysuhteita ja toimintaa on tutkittu ja selvitetty eri kytkentävaihtoehdoilla. Työssä verrataan toteutuneita hyötysuhteita aiempien tutkimusten tuloksiin sekä kehitetään yrityskäyttöön simulointipohjainen laskuri, jota voidaan hyödyntää selvityksissä ja suunnittelun tukena

Ilma-vesilämpöpumppu-kaukolämpöhybridijärjestelmässä on hybridijärjestelmässä muuttujia ja rajoitteita perinteistä hybridijärjestelmää enemmän. Lämpöpumppujen sähköenergian kulutukseen vaikuttaa ulkoilmanlämpötilan mukaan muuttuva hyötysuhde (COP), teho ja lauhduttimen sulatustarve. Järjestelmän käytössä on huomioitava lisäksi ainakin kaukolämmön hinta, sähkön hinta ja energiaperitto. Mahdollisuus todellista käyttötilanteesta poikkeaviin mitoitustuloksiin on merkittävä, mikäli kokojärjestelmän toimintaa ei ymmärretä. Monoblock-järjestelmät ovat harvinaisia asuinrakennuksissa. Yleensä tutkimuksissa on käytetty valmistajien toimittamia tietoja lämpöpumpulta ilman järjestelmähäviöitä.

Työssä tutkitaan koko järjestelmän toimintaa ja selvitetään syitä mahdollisiin suunnittelun ja käytön toiminta-arvojen poikkeamiin.

Useissa kiinteistöissä lämpöpumppujen suorituskyky ei ole vastannut odotuksia, sillä luvattuja säästöjä ei ole saavutettu. Teknisesti monimutkaiset järjestelmät ovat olleet toimivia, mutta käyttöönotossa ja virittämisessä ei ole kerralla onnistuttu. Ongelmia on ollut Rambollin selvityksen mukaan lähes puolissa valmistuneista kohteista [1].

Lämpöpumppujen käyttöä ja nimellisuorituskyvyn suhdetta käytönaikaiseen tilanteeseen on tutkittu laajoilla otannoilla [24, s. 1; 25, s. 1]. Tutkimuksissa arvioidaan myös säästöpotentiaalia laitteiston toimiessa kohteeseen oikeilla säädöillä. Laajasta tutkimusmateriaalista voidaan todeta, että lämpöpumppujen kaikkea hyötypotentiaalia ei saada useimmissa kohteissa käyttöön.

Kansallisarkistosta löytyvästä ensimmäisessä tutkimuksessa lämpöpumpuista vuodelta 1974 on todettu, että lämpöpumppujen toimintalogiikka ja mitoitukset ole vielä vakioituneet. Nykyään, 50 vuotta myöhemmin, tilanne on osittain sama. Käytössä ei ole vakiintuneita ja yleisesti hyväksytyjä kytkentäkaavioita ja toimintaselostuksia, vaan rakennuttaja laadituttaa asiantuntijalla suunnitelmat tapauskohtaisesti. Energiateollisuus ry, energiatuottajien etujärjestö, on tehnyt kaukolämpöhybridijärjestelmiin peruskytkentäkaaviot [26]. Vakioidut kytkentäkaaviot varmistavat kaukolämmön riittävän paluueden jäähtymän.

3 Energian hinta ja siirtymä fossiilisista polttoaineista

3.1 Kaukolämpö

3.1.1 Päästökehityksen vaikutus tuotantoratkaisuihin

Ympäristöministeriön arvioimat energiamuotojen hiilidioksidipäästökertoimet vuosille 2020–2120 ohjaavat energiantuotantoa ja investointeja kohti vähähiilisiä ratkaisuja sääntelyn ja ilmastotavoitteiden kautta. Sähkön ja kaukolämmön päästökertoimet alenevat merkittävästi, mikä tarkoittaa fossiilisista polttoaineista

luopumista niiden valmistuksessa. Päästökehitystä eri energiamuotojen osalta on esitetty taulukossa 1.

Kaukolämmön tuotannossa sähkö- ja lämpöpumpputekniikka sekä biopolttoaineiden käyttö lisääntyy. Fossiilisten polttoaineiden päästökertoimet pysyvät korkeina koko tarkastelujakson ajan, mikä oletettavasti nostaa niiden käyttöön liittyviä kustannuksia.

Taulukko 1. Ympäristöministeriön arvioimat energiamuotojen päästökertoimet vuosille 2020–2120, yksikkönä kg CO_{2e}/MWh [27].

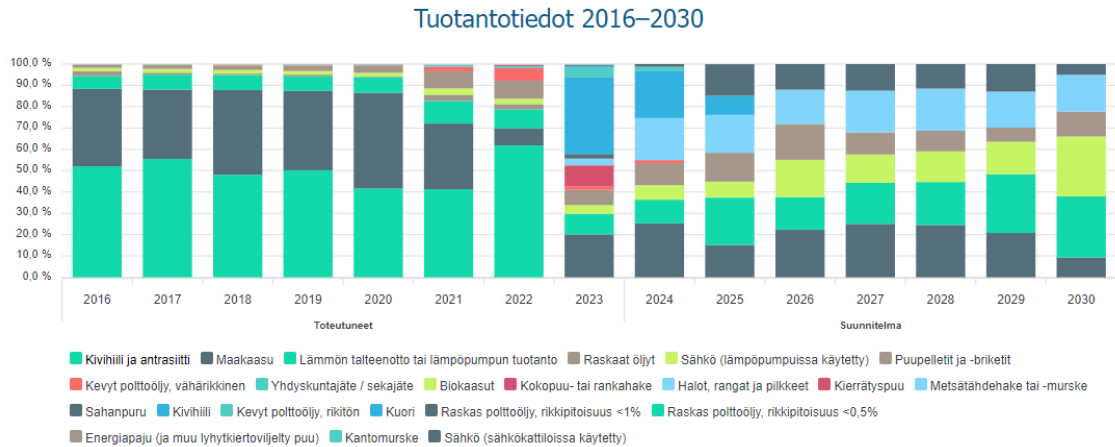
Energiamuoto	2020	2025	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120
Sähkö	146	68	50	39	39	12	7	4	2	1	1	0
Kaukolämpö	171	90	59	36	33	12	6	4	2	1	1	0
Kaukojäähdytys	42	20	14	11	10	3	2	1	1	0	0	0
Fossiiliset polttoaineet	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306	306
Biopolttoaineet	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Uusiutuvat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.1.2 Nykytilanne ja muutos vuoteen 2030

Helenin tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä siirtyä 90-prosenttisesti käyttämään lämpöpumpputekniikkaa, sähköä ja biopolttoaineita luopumalla fossiilisten polttoaineista. Tässä siirtymässä maakaasu säilyy ainoana fossiilisena polttoaineena, jonka osuus pienenee 9,3 %:iin, kun vuonna 2023 sen osuus on vielä 20,1 %. Keskeisin toimenpide vähähiilisyystavoitteiden saavuttamiseksi on kivihiilen polton lopettaminen, sen osuus lämmöntuotannosta on tällä hetkellä 35,9 %. [16.]

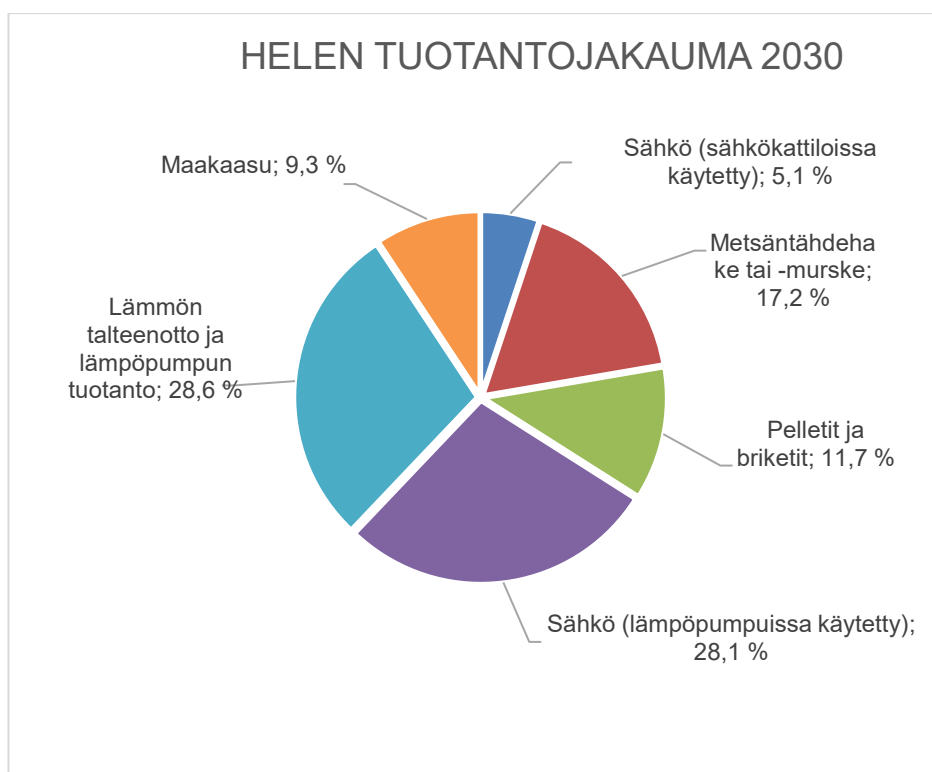
Kuvassa 9 on esitetty kaukolämpötuotantotavat vuosina 2016–2023 ja suunnitelma vuosille 2024–2030. Helsingissä lämpö on tuotettu vuoteen 2020 asti lähes 90 prosenttisesti fossiilisilla polttoaineilla, eli kivihiilellä, antrasiitilla ja maa-

kaasulla. Siirtymä biopolttoaineisiin ja sähköön tulee olemaan nopea, kun kivihiilen poltosta luovutaan laitoksia alas ajamalla ja muuttamalla niitä pellettikäyttöisiksi.



Kuva 9. Helenin toteutunut ja suunniteltu energiantuotanto vuoteen 2030 asti [16].

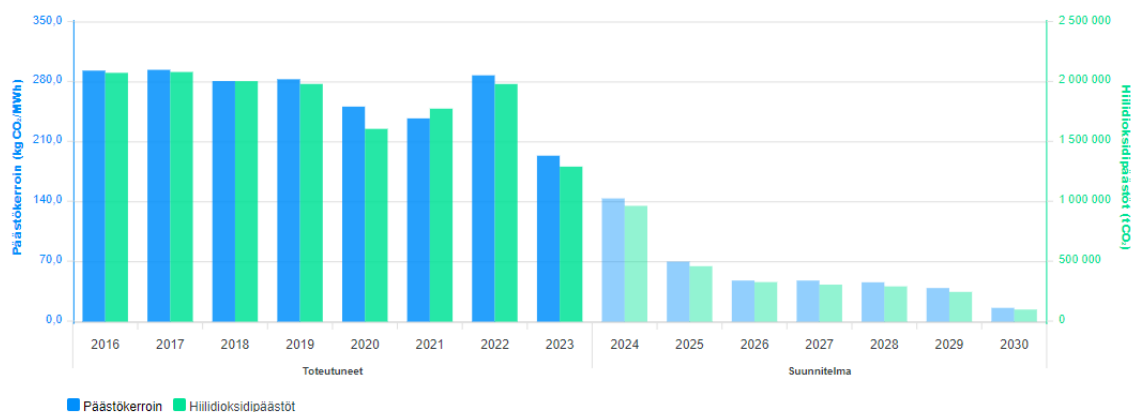
Kuvassa 10 on esitetty vuoden 2030 Helenin suunnitelman mukainen tuotantojakaumaennuste. Lämmöstä on tarkoitus tuottaa lämpöpumpuilla noin 57 %. Fossilisista polttoaineista on käytössä vain maakaasu alle 10 %:n osuudella.



Kuva 10. Suunniteltu kaukolämmön tuotantojakauma 2030, muokattu kuvasta 9 [16].

Siirtymä sähköön ja lämpöpumpputekniikkaan vähentää merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käyttöä, mikä johtaa CO₂-päästöjen huomattavaan alenemiseen. Tämä kehitys näkyy jo suunnitelluissa päästövähennyksissä, joissa päästökerroin laskee vuoteen 2030 mennessä nykyisestä yli 90 %:iin (193,9 => 16,1 kgCO_{2e}/MWh). [15.] Muutokset ovat olennaisia Helsingin vähähiilisyystavoitteiden toteuttamisessa ja pitkän aikavälin energiansäästöissä.

Kuvassa 11 on esitetty Helenin kaukolämmön päästökertoimen ja hiilidioksidipäästöjen kehitys vuosina 2016–2023 ja ennuste vuoteen 2030. Vuodesta 2023 alkaen päästökerroin ja CO₂-päästöt pienenevät merkittävästi, mikä johtuu energian tuotantotapojen siirtymästä vähäpäästöisiin ratkaisuihin. Vuoteen 2030 mennessä hiilidioksidipäästöt vähänevät 2022 tasosta yli 95 %.



Kuva 11. Helenin toteutunut ja suunniteltu päästökerroin ja hiilidioksidipäästöt vuoteen 2030 asti [16].

3.1.3 Lämpöpumput ja arvioitu hyötysuhde

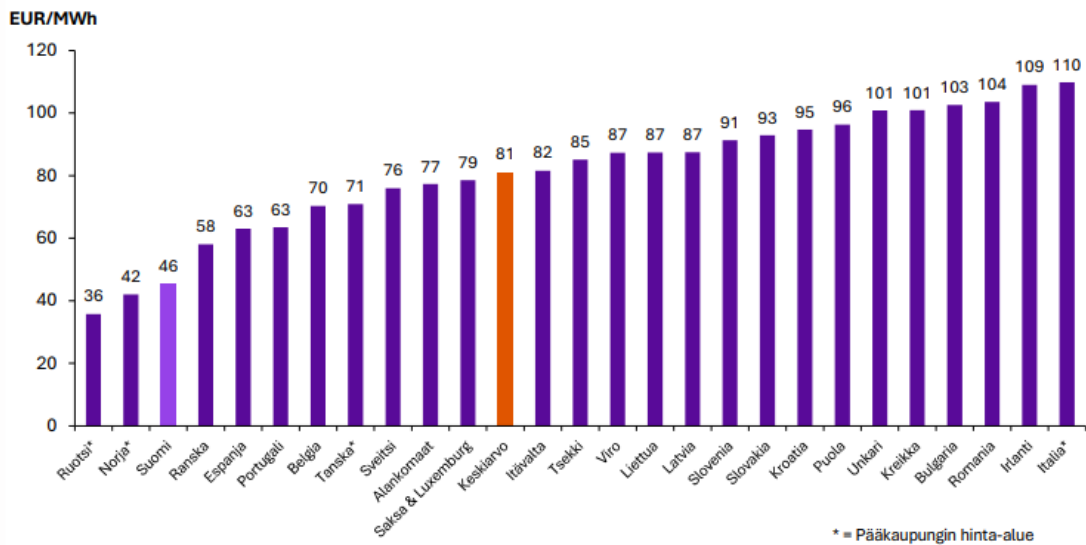
Tavoitteena on, että lämpöpumpuilla tuotetaan vuoteen 2030 mennessä noin 57 % lämmitysenergiasta sähköä hyödyntäen. Kaukolämmön ja sähkön hintatasapaino muodostuu merkittäväksi, kun kolmasosa lämpöenergiasta tehdään sähköllä. Kuvan 10 mukaan Helenin lämpöpumppujen SCOP on 2,0 (lämmöntuotannosta tehdään 56,7 % lämpöpumpuilla ja sähkön osuus on tästä 28,1 % => $(56,7 / 28,1 = 2,02)$).

Lämpökertoimella 2,0 kaukolämpöenergian hinta on noin 50 % tuotantoaikaisesta sähkön hinnasta. Energian kulutus- ja hintahuippuja tasataan lämpövarastoin. Sähkön hinnassa on huomioitava sähköenergian siirto- ja muut kulut. Suomen sähkömarkkinassa, Nord Poolissa, sähkön hinta määräytyy markkinaehtoisesti kysynnän ja tarjonnan perusteella [28].

3.2 Sähkön hinta ja eskalaatio vuodelle 2035

Kuvan 12 mukaan Suomessa oli vuonna 2024 Euroopan kolmanneksi halvin sähkö 46 €/MWh (vuonna 2023 hinta oli 56 €/MWh), kun keskimääräinen hinta Euroopassa oli 81 €/MWh (vuonna 2023 hinta oli 95 €/MWh). Sähkön hinta määräytyy verojen, siirtomaksujen, tehomaksujen yms. mukaan, jotka vaihtelevat toimittajakohtaisesti.

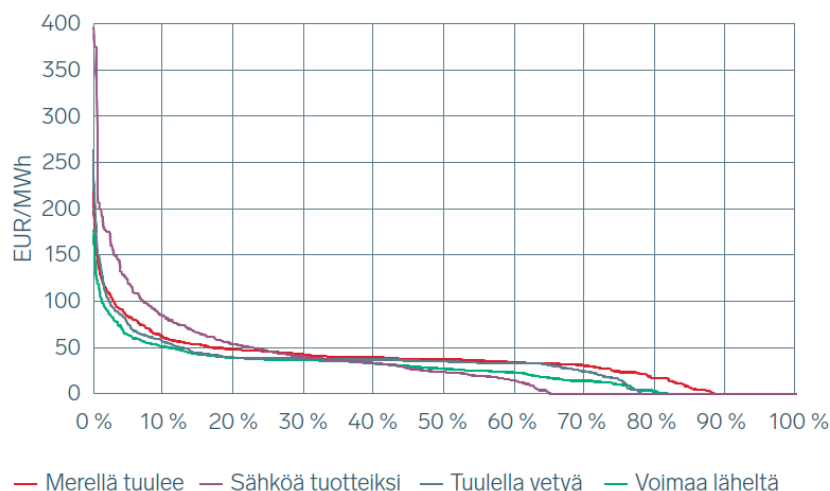
Sähkön tukkuhinnat vuonna 2024 (EU + Norja ja Sveitsi)



Kuva 12. Sähkön tukkuhinnat Euroopassa 2024 [29, s. 28].

Fingridin sähköjärjestelmävisio 2022-julkaisu ennustaa kaikissa skenaarioissa sähkön kulutuksen kasvua, ja se voi jopa kaksinkertaistua nykyiseen verrattuna vuonna 2035 mennessä. Osan kulutuksen kasvusta selittää kaukolämmön fossiilisten polttoaineiden korvaaminen sähköllä ja lämpöpumpuilla. Kaukolämmöstä siirtyminen rakennusten paikalliseen lämmitykseen lämpöpumpuilla ja sähköllä kasvattaisi sähkönkulutusta arviolta 9 TWh. [30, s. 22]. Sähköntuotannon ja kulutuksen tehovaihtelut tulevat olemaan suuria tuulivoiman vaihteluiden vuoksi. Vaihteluita tasataan energiavarastojen ja kulutusjouston avulla, johon sisältyvät taloudelliset kannustimet. Lämmityksen huippukulutus vaihtelee 5–7 GW:n välillä, josta voidaan hoitaa kulutusjoustolla noin puolet. [30, s. 33–35]

Kuva 13 esittää sähkön hinnan nousun todennäköisyyksiä vuonna 2035 eri skenaarioissa. Ennusteen mukaan sähkön hinta nousee nykyisestä tasosta noin 20 %:n todennäköisyydellä. Lisäksi hinnan nousu jää alle 30 €/MWh:n 50 %:n todennäköisyydellä ja alle 60 €/MWh:n 90 %:n todennäköisyydellä. Tämä viittaa siihen, että merkittävä osa hintakehityksestä keskittyy maltillisiin nousuihin, vaikka suuremmat hinnannousut ovat myös mahdollisia epätodennäköisemmissä skenaarioissa. Kuvan skenaarioissa on otettu huomioon tehojousto, uusiutuva energiatuotanto ja energiamarkkinoiden kehityksen vaikutus.



Kuva 13. Sähkön hinnan pysyvyys vuonna 2035 eri skenaarioilla (mediaani), Fingrid Sähköjärjestelmävisio 2022:n mukaan [30, s. 30].

Vaikka sähkön hinnan ennustetaan nousevan useimmissa skenaarioissa, merkittävät hinnannousut ovat epätodennäköisiä. Tämä luo suotuisan ympäristön lämpöpumppujen käytölle ja investoinneille. Kuvan 13 perusteella sähkön hinta vuonna 2035 sijoittuu todennäköisesti välille 70–90 €/MWh, ja 90 % todennäköisyydellä se pysyy alle 110 €/MWh:ssa. Tämä vastaa sähkön hinnan nousua 2,7–4,8 % vuodessa.

4 Lämpöpumpun toiminta

4.1 Lämpöpumpun teoriaa

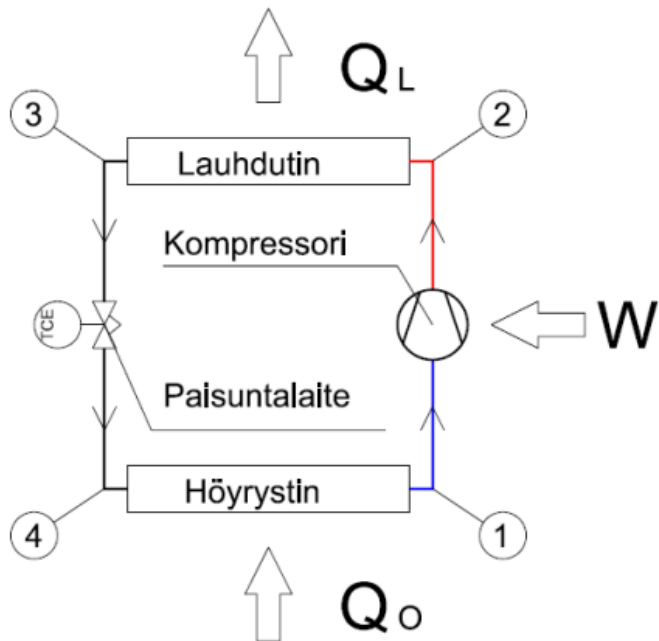
Lämpöpumpun toiminta perustuu termodynamiikan perussääntöihin. Kiertoprosessiin tuotu energia voi muuttua toiseksi energian muodoksi, mutta energian kokonaismäärä ei muutu. Lämpö siirtyy luonnostaan korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpöä siirrettäessä matalammasta lämpötilasta korkeampaan joudutaan prosessiin tuomaan aina ulkopuolista työtä. Lämpöpumppu sovelluksessa tämä tarkoittaa sitä, että höyrystimen kautta kiertoprosessiin siirtyy luonnollisesti energiaa faasimuutoksen yhteydessä. Lauhduttimelle tuleva kyl-

mäaineen tulee olla siirtonestettä tai ilmaa lämpimämpää, jotta lämmön siirtyminen tapahtuu oikeaan suuntaan. Kompressorissa kylmäaineen lämpötila nousee ja lämpöenergia saadaan lauhduttimella siirrettyä haluttuun käyttökohteeseen. [31, s. 223–235.]

4.2 Toimintaperiaate

Lämpöpumpun toiminta perustuu termodynamiikan perussääntöihin. Kiertoprosessiin tuotu energia voi muuttua toiseksi energian muodoksi, mutta energian kokonaismäärä ei muutu [31, s. 223–235]. Lämpöpumpulla siirretään lämpöä matalammasta lämpötilasta korkeampaan. Tämä tapahtuu kylmätekniikan kiertoprosessin avulla, jossa on työaineena kylmäaine. Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, kompressor, lauhdutin ja paisuntalaite, joka on usein paisuntaventtiili.

Kiertoprosessin toimintaperiaate on kuvan 14 mukaisesti seuraava: 1) Kompressorille tuleva kylmäaine on höyrystimessä ja imuputkessa tulistunutta matalapaineista höyryä, jonka kompressor puristaa korkeampaan paineeseen ja samalla sen lämpötila nousee. Tämä tapahtuu systeemiin tuotavan ulkopuolisen työn avulla. 2) Tulistunut ja korkeapaineinen höyry johdetaan lauhduttimelle, jossa se tiivistyy nesteeksi ja lauhtuu luovuttaen lämpöä ympäristöön. 3) Lauhduttimesta kylmäaine johdetaan paisuntalaitteelle, jossa sen paine ja lämpötila laskee. Se alkaa myös osittain höyrystyä jo ennen kuin se saapuu höyrystimelle. 4) Höyrystimellä kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstä tehokkaasti, jolloin loppuosa nestemäisessä olomuodossa olevasta kylmäaineesta höyrystyy. [31, s.18.]



Kuva 14. Periaatekuva kylmäprosessista [31, s. 10].

Kylmäkerroin ε vastaa kylmäprosessin hyötysuhdetta, joka saadaan höyrystimen sitomalämpö Q_o kompressorin tekemällä työllä W .

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{W} \quad (1)$$

Lämpökerroin φ vastaa lämpöprosessin hyötysuhdetta, joka lasketaan jakamalla lauhduttimen luovuttama lämpö Q_L kompressorin tekemällä työllä W

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (2)$$

Carnot-kylmäkerroin määrittää lämpöpumpulle teoreettisen hyötysuhteen ylärajan, jota ei voi ylittää. Käytännön sovelluksissa koneiden hyötysuhteet jäävät huomattavasti teoreettista maksimia alemmalle tasolle ja ovat yleensä luokkaa 0,3–0,6. Kaavoista (3) ja (4) voidaan havaita, että paras hyötysuhde saadaan lämpöpumpuista ja kylmäkoneista mahdollisimman pienellä lauhtumisen (T) ja höyrystymisen (T_o) välisellä lämpötilaerolla. [31, s. 232]

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T-T_0} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{T}{T-T_0} \quad (4)$$

T_0 on matalin prosessissa esiintyvä lämpötila (K)

T on korkein prosessissa esiintyvä lämpötila (K)

4.3 Log p,h -tilapiirros

Kylmätekkinen kiertoprosessi voidaan esittää logaritmisena paine-entalpia-tilapiirroksen avulla jokaiselle kylmäaineelle. Tilapiirroksen rajakäyrä jakaa kylmäaineen eri olomuotoihin, jotka ovat alijäähtynyt neste, neste höyry ja tulistunut höyry. Siitä voidaan lukea kylmäaineen paine, lämpötila ja höyryn tilavuus kiertoprosessiin eri vaiheissa. Kuvan 15 kiertoprosessi on seuraava:

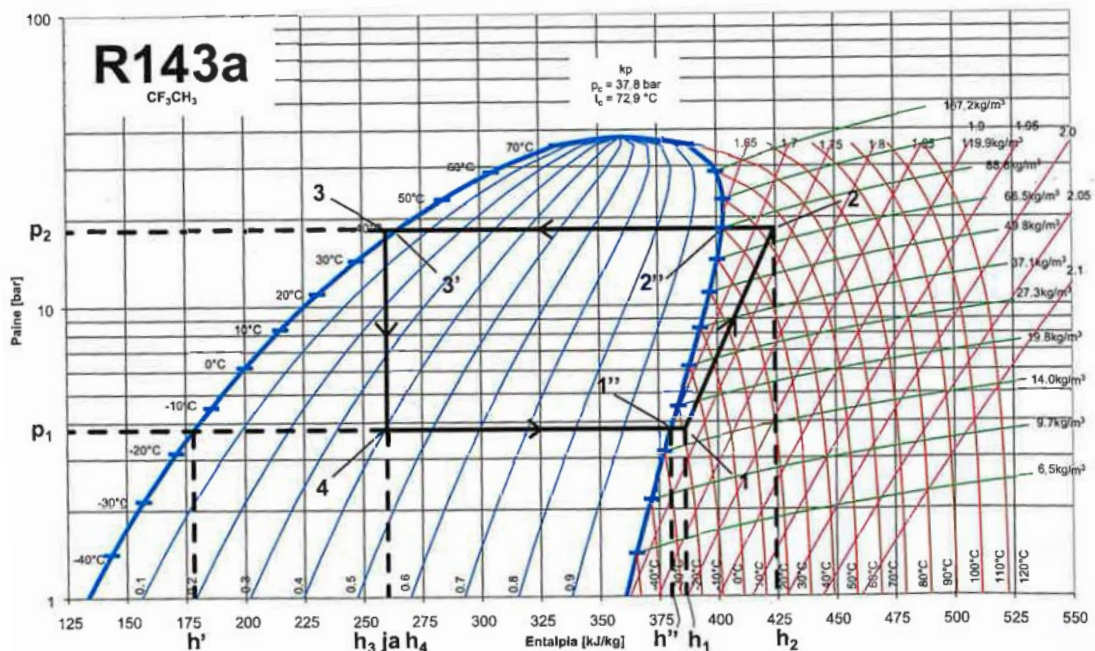
4–1) R143a kylmäaineen höyrystymislämpötila on -15 °C ja paine 3,8 bar. Se tulistuu ja muuttuu kylmäiseksi höyryksi imuputkessa ja kompressorille mennessä.

1–2) Kompressorin puristaa kylmäaineen 18,3 bar paineeseen ja $+45\text{ °C}$ lämpötilaan. Tulistunut höyry muuttuu höyryn ja nesteen seokseksi lauhtumislämpötilassa $+40\text{ °C}$. Kylmäaine R143a tulistuu prosessissa vain 5 °C :ssa ja tulistunut höyryä lauhtumisen tuottamasta lämmöstä on noin 12 % (lasketaan entalpia muutoksen suhteessa $(425-405\text{ kJ/kg}) / (425-296\text{ kJ/kg})$).

2–3) Häviöttömässä kiertoprosessissa lauhtuminen tapahtuu vakio-paineessa, eli 18,3 bar. Lauhdutin luovuttaa lämpöä ympäristöön $425-260\text{ kJ/kg} = 165\text{ kJ/kg}$. Teho voidaan laskea, kun tiedetään kylmäaineen virtaamat tulistuneena höyryä ja neste-höyryseoksena. Kylmäaine alijäähtyy noin 2 °C ja siitä tulee kylmää nestettä.

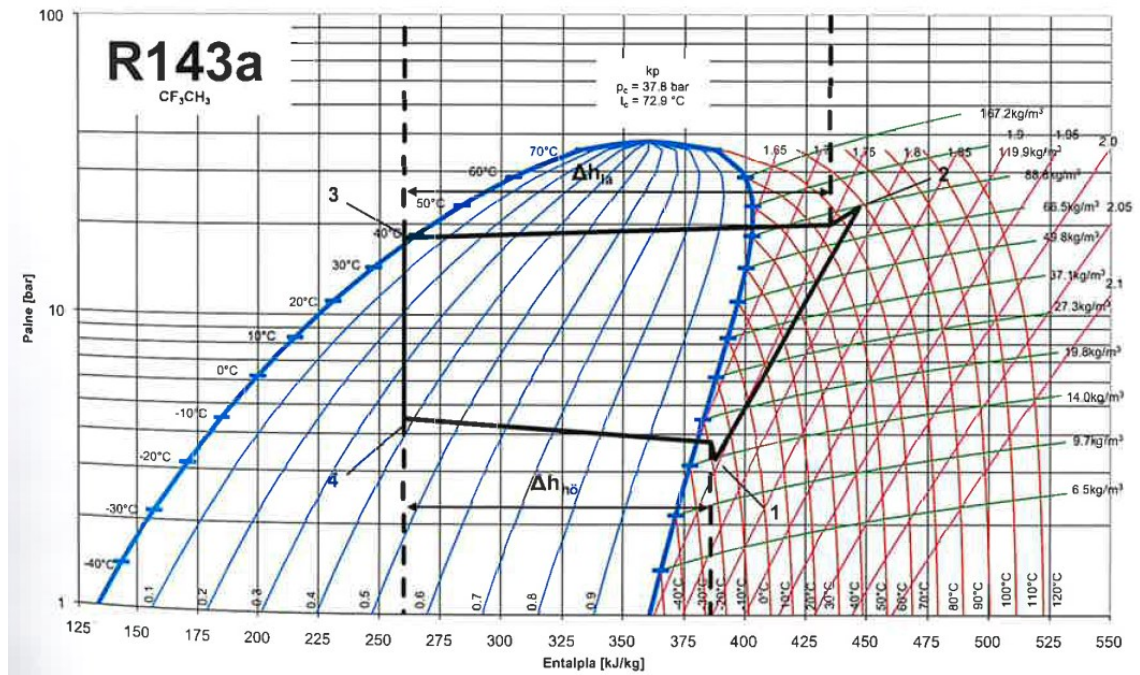
3–4) Lauhduttimesta kylmäaine johdetaan höyrystimelle paisunta-laitteen kautta, jolloin paine laskee 3,8 bar:in höyrystimislämpötilassa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kylmäaineesta muodostuu neste-höyryseosta. Tämän jälkeen kierto prosessi alkaa alusta.

Tilapiirros osoittaa, että yksikomponenttinen kylmäaine R143a soveltuu erityisesti jäädytysjärjestelmiin, mutta sillä ei voida tehokkaasti tuottaa korkeita lämpötiloja, kuten lämmintä käyttövetä. Kylmäaineena R143a on vanhentunut korkean GWP-arvon 4470 vuoksi (Global Warming Potential) [31, s. 43].



Kuva 15. Yksikomponenttisen kylmäaineen R143a häviötön kierto prosessi log p,h -tilapiirroksessa [31, s. 26].

Todellisessa kylmäteknisessä kierto prosessissa syntyy aina useita erilaisia häviöitä, jotka aiheuttava poikkeamia kuvan 16 häviöttömään prosessiin verrattuna. Häviöitä aiheuttavat kompressorin puristuksen kitka ja kompressorin imu- ja paineventtiilien aiheuttama painehäviö. Kuvassa 16 on esitetty häviöt liioitellun suurina. [31; s. 29.]



Kuva 16. Yksikomponenttisen kylmäaineen R143a todellinen kierto prosessi log p,h -tilapiirroksessa [31, s. 29].

4.4 Hyötysuhde, COP

Lämpöpumpun hyötysuhde voidaan laskea kaavoista (1) ja (2), kun tiedetään kompressorin kuluttama sähköteho ja lauhduttimelta tai höyrystimeltä saatu lämpöenergia. Tämä ei kuitenkaan kerro koko järjestelmän tehokkuutta ja on riittämätön toiminnan ja kannattavuuden arviointiin.

Järjestelmäkohtaiseen hyötysuhteeseen täytyy ottaa huomioon myös lämpöpumpun toimintaan liittyvät sähköä kuluttavat laitteet ja lämmönsiirron lämpöhäviöt.

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_{h\dot{o}}}{h_2 - h_1} \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{\Delta h_{LA}}{h_2 - h_1} \quad (6)$$

$\Delta h_{h\dot{o}}$ on höyrystimen todellinen entalpiamuutos (kJ/kg)

Δh_{LA} on lauhduttimen todellinen entalpiamuutos (kJ/kg)

5 Poistoilman lämmöntalteenoton toteutettavuuslaskuri

5.1 Tavoite

Työssä tehdään Excel-laskuri, jolla voidaan arvioida lämmöntalteenoton toteutettavuus tehopeiton, energiapeiton, lämpöpumpulta saatavan tehon avulla. Lähtötietona laskuriin annetaan asunneliöt ja kiinteistön energian kulutus.

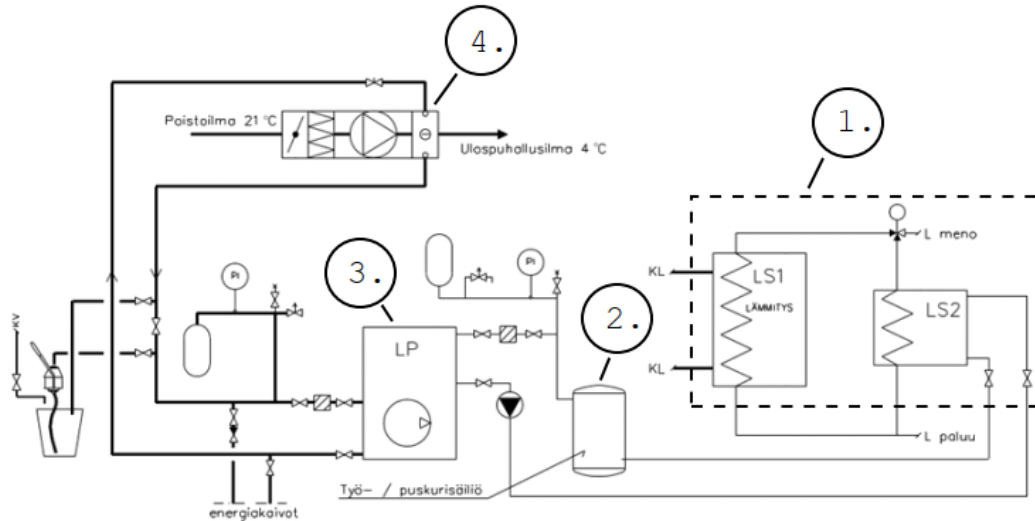
Laskurilla simuloidaan sisäilman kosteuden vaikutusta poistoilmasta saatavaan energiamäärään. Vuosihyötysuhde (SCOP) lasketaan tutkimalla kahdeksan kiinteistön hyötysuhteita, joihin on asennettu PILP-järjestelmä. Yhtä järjestelmää tutkitaan tarkemmin Ouman Ounet -etähallintajärjestelmän kautta. Saatuja tuloksia verrataan aikaisempiin tutkimuksiin ja RT-kortteihin.

5.2 Toimintaperiaate

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmä (PILP) on ratkaisu, joka hyödyntää rakennuksen poistoilmasta talteen otettua lämpöä lämmityksen ja käyttöveden lämmittämiseen. PILP-järjestelmä ei yksinään riitä kiinteistön ainoaksi energialähteeksi, vaan se tarvitsee lisälämmönlähteen, joka on yleensä kaukolämpö. [20, s. 2.] Kahden eri lämmitysmuodon yhdistämisen vuoksi järjestelmää kutsutaan usein hybridijärjestelmäksi.

Järjestelmän toiminta, kuvan 17 mukaisesti, perustuu poistoilman lämpöenergian talteenottoon rakennuksen poistoilmavirtaan sijoitettavan lämmönsiirtimen avulla. Talteen otettu lämpöenergia hyödynnetään lämpöpumpun avulla kiinteistön käyttöveden ja rakennuksen lämmittämiseen. Poistopuhaltimen yhteydessä oleva lämmönsiirrin siirtää lämpöä poistoilmasta siirtonesteeseen. Lämpöenergia siirretään lämmönsiirtonesteellä lämminvesivaraajaan. Lämmönsiirtonesteinä käytetään yleensä glykoli- tai alkoholiliuosta, erityisesti jos järjestelmä on yhdistetty maalämpöjärjestelmään. Järjestelmän pääkomponentit ovat kuvassa

17: 1) Kaukolämpösiirryksikkö ja ohjauskeskus, 2) vesivaraaja, 3) lämpöpumppu ja 4) poistoilmapuhallin ja talteenottoyksikkö.



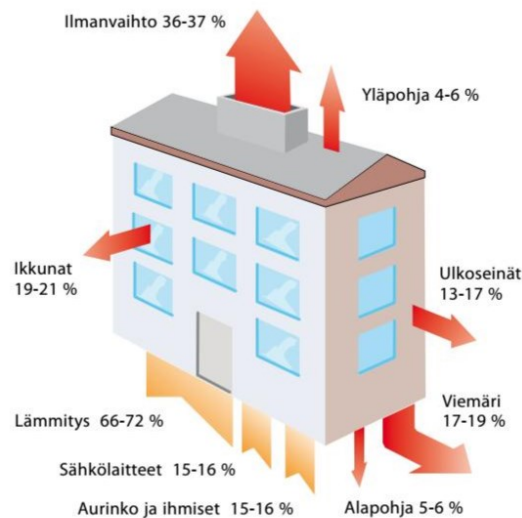
Kuva 17. Periaatekuva kiinteistön PILP-järjestelmän kytkennästä kaukolämmön rinnalle hybridijärjestelmäksi muokattuna [20, s. 3].

5.3 Soveltuvuus

PILP-järjestelmä soveltuu käytettäväksi rakennuksissa, joissa on koneellinen poistoilmanvaihto, vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä sekä lämpöpumpuille sopivat lämpötilat. Järjestelmää käytetään yleensä vähintään kolmikerroksisissa rakennuksissa, joissa on 15–25 asuntoa. Alimpia soveltuvia poistoilmamääriä ei ole määritetty, mutta suunnittelussa tulee käyttää ilmanvaihdon normaalikäytön ilmamääriä, eli puhaltimen pienemmän nopeuden ilmavirtoja. [20, s. 4–5]. Poistoilmavirrat ovat 15–25 l/s asunnon kerrostalossa tehostetussa ja normaalissa käytössä noin 540/300–950/500 l/s, kun poistoilmavirrat ovat keittiöissä: –22/12 l/s ja kylpyhuoneissa: –16/8 l/s.

Oletuksena on, että WC on kylpyhuoneen yhteydessä. Vaihtoehtoisesti poistoilmamäärä voidaan arvioida rakennusmääräyskokoelman D2 (1978) mukaan asuinneliöiden ja ilmanvaihdon pienimmän sallitun kertoimen ($0,35 \text{ dm}^3/\text{sm}^2$) perusteella. Vuoden 1987 rakennusmääräyksissä ilmanvaihtuvuuden tuli olla vähintään $0,5 \text{ 1/h}$. [32, s. 4–3; 33, s. 5.]

Kuvassa 18 on esitetty keskimääräinen lämpöenergiatase 1960–1980-luvun asuinkerrostalossa. Rakennusten kokonaisenergian kulutuksesta koneellisen poiston ilmavaihdon osuus on noin 36–37 %. [34, s.18]. Poistoilman sisältämästä energiasta saadaan merkittävä osa talteen, kun $+22 \text{ °C}$:n lämpöinen sisäilma puhalletaan ulos LTO-siirtimen jälkeen $3\text{--}4 \text{ °C}$:n lämpöisenä. Vaipan mahdolliset korjaukset kannattaa tehdä ennen PILP-asennusta tai ottaa ne huomioon mitoituksessa, jotta laitteisto voidaan mitoittaa uuden tilanteen mukaiseksi ja välttyään ylimitoitukselta.



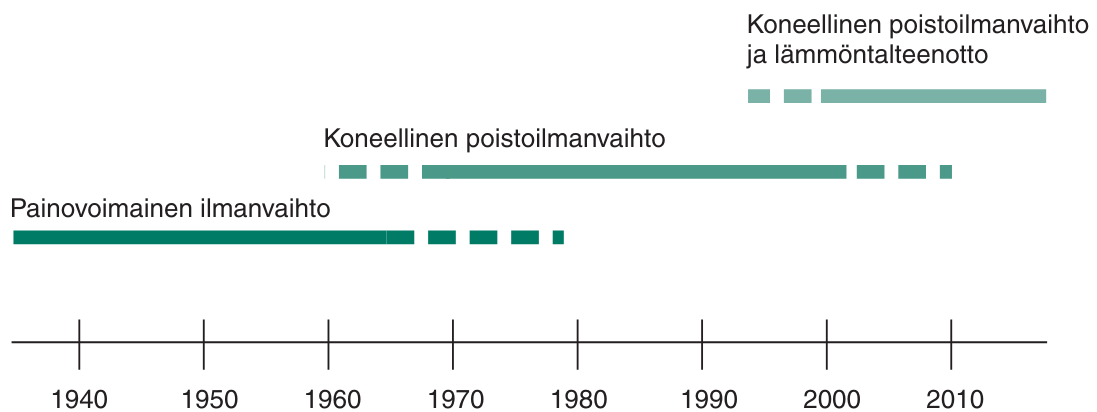
Kuva 18. Lämpöenergiatase 1960–1980-lukujen asuinkerrostaloissa [34, s. 18].

5.4 Koneellinen poistoilmavaihto asuinkerrostaloissa

Koneellinen poistoilmavaihto alkoi yleistyä Suomessa 1960-luvulta alkaen ja laitteita on asennettu aina 2000-luvulle asti [35, s. 2]. Huippuimurit oli varustettu

kahdella eri toimintanopeudella ja niitä säädettiin yleensä aika- ja lämpötilaohjauksella. Ilmanvaihtoa tehostettiin muutaman tunnin jaksoissa lähinnä aamuisin ja ruuanlaittoaikoina. [36, s. 26.] Korvausilma tuli pääosin ikkunoiden tai seinäventtiilien kautta sekä vuotoilmana.

Rakennusmääräyksiin tuli lokakuussa 2003 velvoite poistoilman lämmöntalteenotosta [37, s. 1]. Poistoilmajärjestelmiä oli mahdollista asentaa sen jälkeen vain, jos rakennuslupa oli haettu ennen uusien velvoitteiden voimaan tuloa tai erityisluvalla. Kuvassa 19 on esitetty erityyppisten ilmanvaihtojärjestelmien toteutus asuinkerrostaloissa eri vuosikymmeninä.



Kuva 19. Ilmanvaihtojärjestelmät asuinkerrostaloissa rakennusajankohdan mukaan [3, s. 2].

5.5 Tutkittavat PILP-kohteet

5.5.1 Kohdetiedot

Tutkimuksessa oli mukana kahdeksan koneellisen poiston kiinteistöä, joihin on asennettu lämmöntalteenottojärjestelmä. Rakennukset ovat valmistuneet vuosina 1972–2002. Tarkemmat kohdetiedot ovat taulukossa 2. Seurantajakso oli kaikilla kohteilla 5.9.2021–5.9.2022. Käytössä olivat kuukausikohtaiset kaukolämmön ja sähkön kulutustiedot. Järjestelmästä oli saatavilla myös kumulatiivi-

nen kulutettu sähköenergia ja tuotettu lämpöenergia. Sähköenergian kulutus sisältää myös pumppujen ja oheislaitteiden sähkön kulutuksen. Etähallintajärjestelmästä saatiin myös kuukausikohtainen tuottolaskelma. Tutkimuskohteissa lämpöpumpulla tuotetaan ensisijaisesti käyttövettä ja lämmitystä energiatuoton riittävyyden mukaan.

Tavoitteena on selvittää kohteiden poistoilmalämpöpumpun lämpökertoimet kuukausitasolla ja laskea niistä vuosihyötysuhde (SCOP), jota käytetään Excel-mitoitustyökalussa.

Taulukko 2. Tutkittavat koneellisen poiston asuinkerrostalot, joihin on asennettu poistoilman talteenottojärjestelmä.

Kohde	Paikka	Valm. vuosi	Tyyppi	Lämmitys	Ilmanvaihto	Lämmönjako	Rak. kpl	Huon. kpl	Kerros kpl	Tilavuus m ³	Kok. ala m ²	Kerrosala m ²	Huon. ala m ²	Asuinhuon. ala m ²	E-Luku
Kohde 1	Hel-sinki	1972	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	4	75	3-4	22212	7133	6055	4815	4783	117 / C
Kohde 2	Hel-sinki	1972	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	3	162	6-8	44605	15094	12865	10239	9622	123 / C
Kohde 3	Hel-sinki	1966	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	92	92	9	24336	8645	7676	6239	6239	152 / D
Kohde 4	Hel-sinki	1966	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	80	80	9	18357	6522	5790	4681	4681	152 / D
Kohde 5	Hel-sinki	1970	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	107	104	6	24480	8861	7177	5807	5757	131 / D
Kohde 6	Hel-sinki	1970	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Vesikiertoiset radiaattorit	42	47	4	10378	3637	2946	2309	2288	148 / D
Kohde 7	Hel-sinki	1974	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Radiaattori- ja lattialäm-mitys	1	110	8	30133	10353	7744	6380	6323	117 / C
Kohde 8	Espoo	2002	Kerros-talo	KL+PILP	Koneelli-nen poisto	Ei tiedossa	2	42	2-6	Ei tied.	Ei tied.	Ei tied.	Ei tied.	Ei tied.	D

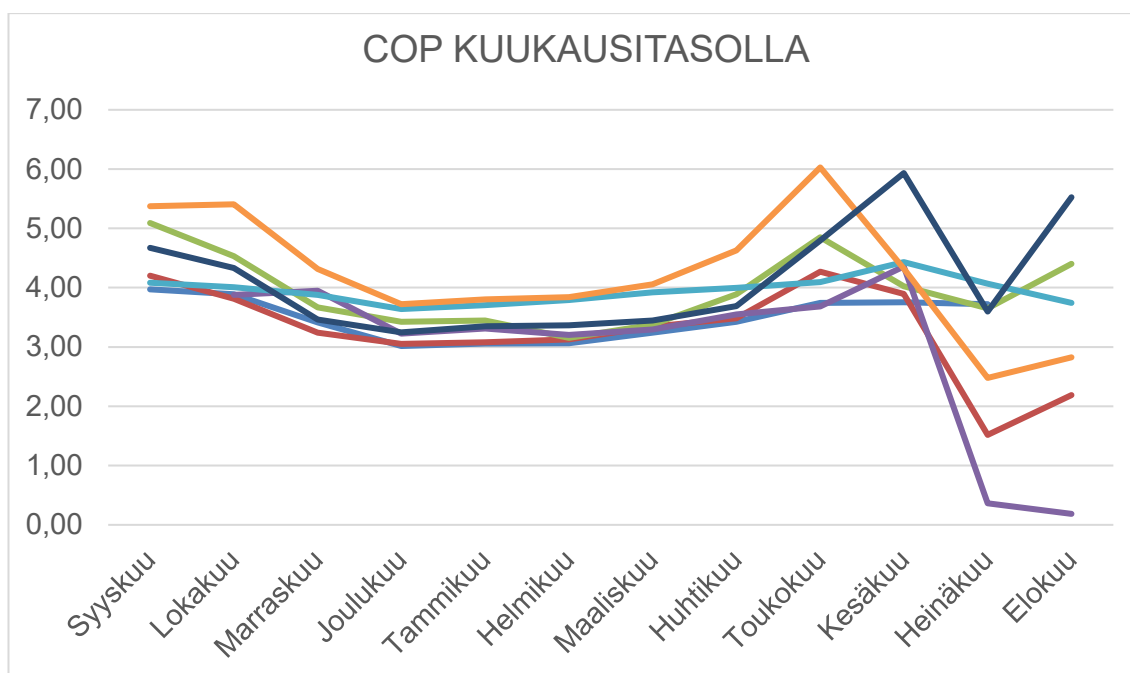
5.5.2 Tutkimuksen kohdekohtaiset lämpökertoimet

Tutkimuskohteiden lämpökertoimet on esitetty kuvassa 20. Ne on laskettu kohdekohtaisesti etähallintajärjestelmästä saaduista kuukausittaisista PILP-järjestelmän sähkökulutuksista ja lämpötuotannoista. Lämpökertoimien muutokset ovat eri kuukausien välillä samansuuntaisia kaikissa kohteissa. Energiapelite-laskurin mukaan vuoden lämmitystarpeesta loka-huhtikuu (7 kk) kattaa noin 82

%. Lämmityskauden ulkopuolella lämpökertoimien erot kasvavat, kun lämpöpumpulla tuotetaan pääosin käyttövettä. Kesäaikana (kesä-elokuussa) tuotetaan vain käyttövettä, jolloin lämpökertoimien vaihteluväli kasvaa. Lämmityskauden korkeimmat lämpökertoimet saavutetaan leudommilla pakkasjaksoilla, jolloin ulkolämpötila on korkeampi kuin sydäntalvella. Tällöin lämmitysverkoston menoveden lämpötilapyynti on alhaisempi ja lämpöpumpun hyötysuhde paranee. Kohteiden 7 ja 8 lämpökertoimet poikkesivat muista, joten kiinteistöjä tutkittiin tarkemmin.

Kohteessa 7 kuukausittainen lämpökerroin vaihtelee välillä 4,0–3,7 ja SCOP on 3,99. Lämmityskaudella COP pysyy poikkeuksellisesti lähes vakiona ja kesäkaudella se laskee vain vähän. Energiatodistuksen mukaan rakennuksen ikkunat, parvekeovet ja ulko-ovet on uusittu ja ulkoseiniä on lisälämmöneristetty. Linjasaneeraus on tehty 2018. E-luku on 117. ARA:n energiastatistustilaston mukaan vuosina 1966–1974 rakennettujen asuinrakennusten keskimääräinen E-luku on 160 kWh/m²/vuosi ja paras 15 % on alle 133 kWh/m²/vuosi. Rakennus on energiatehokas saman ikäkauden rakennuksiin verrattaessa. Kohteessa 7 on uima-allasosasto, jonka lämmitys PILP-järjestelmällä selittää todennäköisesti poikkeuksellisen tasaisen tehontuoton ympäri vuoden.

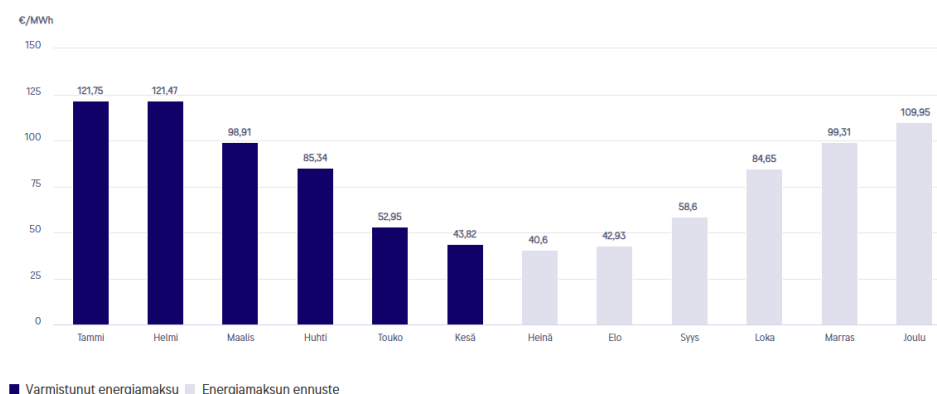
Kohde 8 on valmistunut vuonna 2002, kun taas muut vertailun kiinteistöt ovat 1960–70-luvulta. Oletettavasti vaipan parempi lämmöneristys ja lämmitysverkoston alhaisemmat mitoituslämpötilat selittävät vertailun parhaan lämpökertoimen, joka on 4,18. Kohteita 7 ja 8 ei huomioida varsinaisessa vertailussa, vaan ne käsitellään omina tapauksinaan.



Kuva 20. PILP-järjestelmien kuukausittainen COP, kuvassa kohteet 1–2 ja 3–4 on yhdistetty, koska ne ovat samaa kiinteistöä ja muuten yhden kiinteistön painoarvo kasvaisi suuremmaksi.

Lämpökertoimet (SCOP) vaihtelivat seurantakohteissa 1–6 vuositasolla välillä 3,37–3,65. Yksittäiseen vuoteen vaikuttaa merkittävästi ulkoilman keskilämpötila, joten laskentaan otetaan huomioon järjestelmien koko toiminta-aika. Seurantakohteiden PILP-järjestelmät ovat yhteensä olleet käytössä noin 40 vuotta ja lämpökerroin on koko toiminta-ajalta 3,62. Laskennassa käytetään SCOP-arvoa 3,56, jossa ei ole huomioitu kohteita 7–8.

Energiamaksu 1.1.2025 alkaen (hinnat sis. alv 25,5 %)



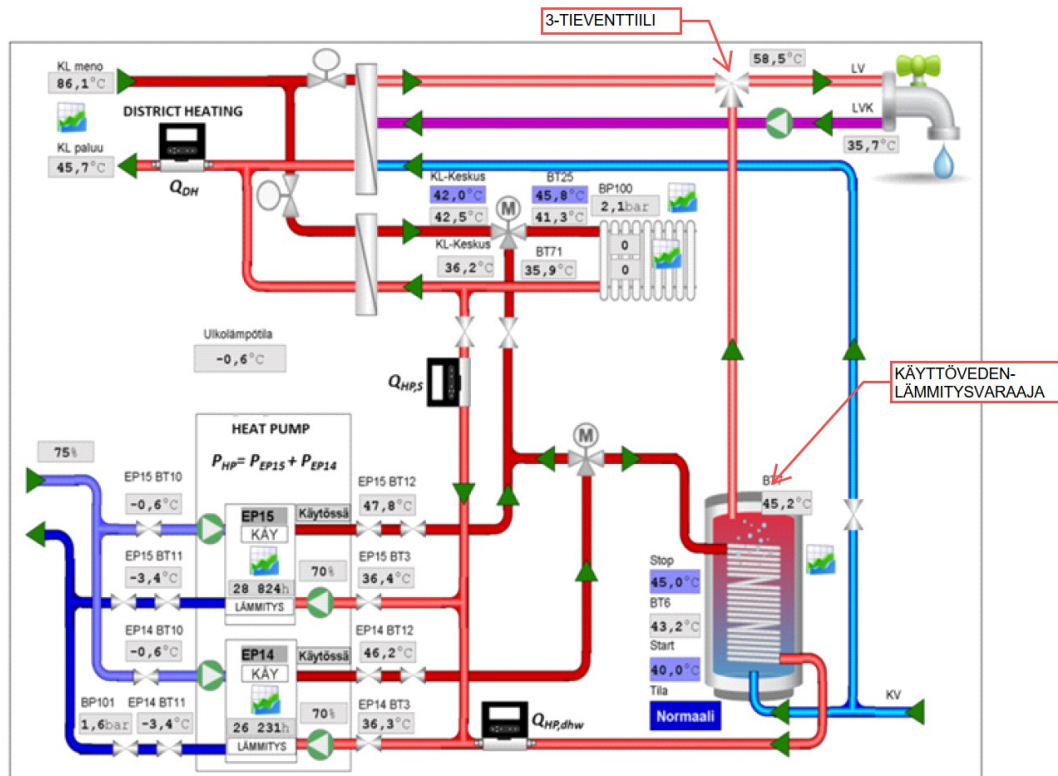
Kuva 21. Helenin kaukolämmön kuukausittaiset hinnat vuonna 2025 [38].

Kesäkuukausien (kesä–elokuu) osuus vuoden lämmönkulutuksesta on noin 8 % energiapienlaskurin mukaan. Kaukolämpöenergian hinta on kuvan 21 mukaan Helsingissä 42,5 €/MWh, eli edullisempaa kuin keskimääräinen sähkön tukkuhinta vuosina 2023 (56 €/MWh) ja 2024 (46 €/MWh) ilman veroja, siirtomaksu ja muita kuluja. Lämpöpumppujen käytön kannattavuus kesällä täytyy arvioida tapauskohtaisesti.

5.5.3 Vertaistutkimukset ja SCOP-arvot

1) VTT tutki energiateollisuus Ry:n tilaamassa tutkimuksessa Poistoilmalämpöpumppuja kaukolämpöjärjestelmässä 13 PILP-kohteen toimintaa. Tutkimuksessa päädyttiin keskimääräiseen lämpökerroin-arvoon (SCOP) 3,5. [21, s. 25.]

2) Pylsyn ja Kurniskin 2 kohteen tutkimuksessa kuukausikohtaiset lämpökertoimet (COP) vaihtelivat välillä 3,1–4,6 ja SCOP keskiarvo oli noin 3,7 [22, s. 1].



Kuva 22. Pylsyn ja Kurniskin tutkimuskohteissa käytetty poistoilman lämmöntalteenoton hybridikytkentäkaavio [22, s. 3].

Hybridijärjestelmällä kaukolämpöpaluun riittävä jäähtymä ja tehokas lämpimän käyttöveden esilämmitys on haastava toteuttaa [20, s. 26]. Kuvan 22 mukaisella kytkennällä kaukolämmön jäähtymä pysyy hyvänä. Kytkentävaihtoehdossa tulee huomioida, että legionellabakteereille on mahdollista tulla otolliset kasvuolosuhteet lämmitysvaraajaan. Legionelloille suotuisa kasvuympäristö on lämpötila-alueella +20–45 °C [39]. Varaajalta lähtevä vesi on +45 °C ja hystereesi 5 °C. Lämminvesi kerrostuu ja korvautuu kylmällä vedellä. Helen ei suosittele 3-tieventtiilikytkentää käyttöveden monimutkaisen säästöprosessin vuoksi [40, s. 2].

3) M. Thalfeldtin, J. Kurnitskin ja E. Latõšovin tutkimuksessa ”Poistoilmalämpöpumppujen kytkentäkaaviot ja tasapainotetun lämmöntalteenotolla varustetun ilmanvaihdon vaikutus kaukolämmön energiankulutukseen ja paluulämpötilaan” selvitettiin lämpöpumppujen hyötysuhdetta kolmella eri kytkentävaihtoehdolla.

Kaukolämmön paluulämpötilan nousu vaihteli välillä +10–15 °C. Kytkevävaihtoehtoilla ei havaittu merkittävää vaikutusta lämpöpumppujen lämpökertoimeen, joka oli tutkimuksessa noin 3,6. [23.]

5.5.4 Tutkimusten yhteenveto

Seurantakohteiden poistoilman lämmöntalteenoton lämpökertoimien keskiarvoksi saatiin 3,56. Vertaistutkimusten lämpökertoimet vaihtelivat välillä 3,5–3,7, ja niiden keskiarvo 3,6 vastasi hyvin seurantakohteista saatuja tuloksia.

Tutkimuksen perusteella poistoilmasta saatavaa lämpöä kannattaa hyödyntää 1960–70-luvuilla rakennetuissa kiinteistöissä erityisesti matalan lämpötilan kohteissa, kuten lattialämmityksessä ja uima-allasosaston lämmityksessä. Näissä ja uudemmissa kohteissa lämpökerroin tulisi arvioida tapauskohtaisesti, sillä tutkimuksen perusteella se voi olla korkeampi kuin 3,6 ja vaikuttaa siten investointipäätöksiin. Suunnitteluvaiheessa on tärkeää ottaa huomioon poistoilman aggressiivisuus laitevalinnoissa. Lämpökerroin vaikuttaa olevan keskimääräistä parempi 2000-luvun kerrostaloissa, mikä tekee poistoilman lämmöntalteenotosta houkuttelevan vaihtoehdon myös uudempien rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa.

Pylys ja Kurniskin tutkimuksessa käytetty kytkentäkaavio [22] voi myös parantaa lämpökerrointa hieman verrattuna muihin kytkentävaihtoehtoihin, koska lämmin käyttövesi lämmitetään lämpöpumpulla vain +45 °C:seen. Järjestelmän optimointi on tärkeä osa suunnittelua, jotta lämpöpumput ovat mahdollisimman energiatehokkaita.

5.6 Poistoilmasta saatava energiateho

Työtä varten tehdyllä Excel-laskurilla voidaan tutkia ilman käyttäytymistä, kun siitä otetaan energiaa lämmitykseen tai jäähdytykseen. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty poistoilmasta saatava sisäilman ulospuhallusenergia 20–60 % suhteelli-

sella kosteudella. Esimerkissä on huomioitu sensible- ja latenttienergia ilmavirralla $1 \text{ m}^3/\text{s}$, ilmantiheydellä $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$. Mitoituslämpötilat ovat RT-kortiston mukaisia: sisälämpötila $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ulospuhallusilman lämpötila $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ [20, s. 5]. Käytetyt kaavat ovat esitetty liitteessä 1.

Entalpialaskelmien perusteella suhteellisen ilmankosteuden muutos 20–60 %:iin lisää poistoilmasta saatavan energian määrää 64 %. Talvella, matalan sisäilman kosteuden jaksolla, latenttienergiaa ei saada hyödynnettyä. Sisä- ja ulospuhallusilman entalpioita analysoitaessa havaittiin seuraavat muutokset poistoilman energiamäärissä ($+22 \text{ }^\circ\text{C}$):

- 21,9 kW, RH 20 %
- 23,3 kW, RH 30 %
- 27,5 kW, RH 40 %
- 31,7 kW, RH 50 %
- 35,9 kW, RH 60 %

Ilman suhteellisella kosteudella on merkittävä vaikutus poistoilman kastepisteeseen. Poistoilman kastepisteet sisäilman lämpötilassa $+22 \text{ }^\circ\text{C}$ ovat seuraavat:
[41.]

- RH 20 %, Poistoilma ei saavuta kastepistettä.
- RH 30 %, Kastepiste on $+3,6 \text{ }^\circ\text{C}$.
- RH 40 %: Kastepiste on $+7,8 \text{ }^\circ\text{C}$.
- RH 50 %: Kastepiste on $+11,1 \text{ }^\circ\text{C}$.
- RH 60 %: Kastepiste on $+13,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Lämmöntalteenottoyksikössä kondensoituvan veden määrä saadaan laskettua kaavalla:

$$v_{kond} = \Delta x \cdot q_v \cdot \rho_i \quad (7)$$

jossa

V_{kond}	on kondenssiveden massavirta, kg/s
Δx	on absoluuttisen kosteuden muutos, kgH ₂ O/kgk.i
q_v	on ilman tilausvirta, m ³ /s
ρ_i	on ilman tiheys, 1,2 kg/m ³

Kondensoituvan veden lämpöteho voidaan laskea kaavalla:

$$Q_{kond} = q_{m, kond} \cdot c_{p_v} \cdot \Delta T \quad (8)$$

jossa,

Q_{kond}	on kondenssiveden lämpöenergia, kWh
c_{p_v}	on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kg K
$q_{m, kond}$	on kondenssiveden massavirta, kg/s
$\Delta T_{kastepiste}$	on kastepisteen ja poistoilman lämpötilan erotus, °C

Kondenssivettä alkaa kertyä lto-patterille ilman suhteellisen kosteuden ylittäessä 30 % sisäilman lämpötilalla +22 °C. Kondenssiveden määrä on varsin pieni.

Taulukko 3. PILP:n teho ilmavirralla 1 m³/s, sisäilman lämpötiloilla 10–25 °C ja suhteellisella kosteudella 20 %.

Sisäilman Lämpötila	Ilmavirta	Ulospuhallus lämpötila	Sisäilman kosteus	Ulospuhallusilman kosteus	Entalpia, sisäilma	Entalpia, ulospuhallus	Lämpöteho (sensible)	Lämpöteho (latentti)	Lämpöteho (yhteensä)	LTO-patterin kondenssivesi
°C	m ³ /s	°C	RH	%	kJ/kg	kJ/kg	kW	kW	kW	dm ³ /h
25	1,0	4	20 %	77,9 %	35,1	13,8	25,5	0,0	25,5	0,0
24	1,0	4	20 %	73,4 %	33,5	13,3	24,3	0,0	24,3	0,0
23	1,0	4	20 %	69,1 %	32,0	12,7	23,1	0,0	23,1	0,0
22	1,0	4	20 %	65,0 %	30,4	12,2	21,9	0,0	21,9	0,0
21	1,0	4	20 %	61,2 %	28,9	11,7	20,6	0,0	20,6	0,0
20	1,0	4	20 %	57,5 %	27,4	11,3	19,4	0,0	19,4	0,0
19	1,0	4	20 %	54,0 %	26,0	10,8	18,2	0,0	18,2	0,0
18	1,0	4	20 %	50,7 %	24,6	10,4	17,0	0,0	17,0	0,0
17	1,0	4	20 %	47,6 %	23,1	10,0	15,8	0,0	15,8	0,0
16	1,0	4	20 %	44,7 %	21,8	9,6	14,5	0,0	14,5	0,0
15	1,0	4	20 %	41,9 %	20,4	9,3	13,3	0,0	13,3	0,0
14	1,0	4	20 %	39,3 %	19,1	9,0	12,1	0,0	12,1	0,0
13	1,0	4	20 %	36,8 %	17,7	8,6	10,9	0,0	10,9	0,0
12	1,0	4	20 %	34,5 %	16,4	8,4	9,7	0,0	9,7	0,0
11	1,0	4	20 %	32,3 %	15,1	8,1	8,5	0,0	8,5	0,0
10	1,0	4	20 %	30,2 %	13,9	7,8	7,3	0,0	7,3	0,0

Poistoilman lämmönsiirtimessä ei tiivisty vettä sisäilman taulukon 3 suhteellisella kosteudella 20 %, tämä vastaa RT-kortiston mitoitusohjeen ilmanolosuhteita [20]. Jos laitteisto mitoitetaan ohjeen mukaisesti jättämällä latenttienergian potentiaali ja tehostetut ilmamäärät huomiotta, voi osa poistoilman energiapotentiaalista jäädä hyödyntämättä.

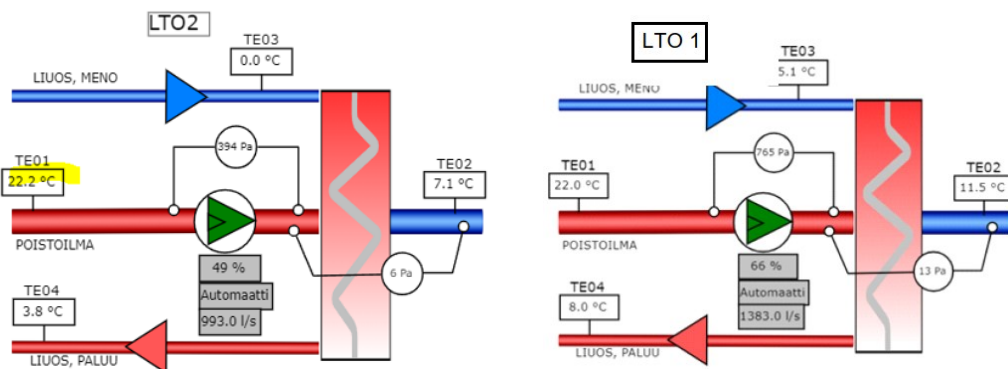
Taulukko 4. PILP:n teho ilmavirralla 1 m³/s, sisäilman lämpötiloilla 10–25 °C ja suhteellisilla kosteuksilla 30–100 %. Poistoilman lämmönsiirtimessä tiivistyy kondenssivettä.

Sisäilman Lämpötila	Ilmavirta	Ulospuhallus lämpötila	Sisäilman kosteus	Ulospuhallusilman kosteus	Entalpia sisäilma	Entalpia ulospuhallus	Lämpöteho (sensible)	Lämpöteho (latentti)	Lämpöteho (yhteensä)	LTO-patterin kondenssivesi
°C	m ³ /s	°C	RH	RH	kJ/kg	kJ/kg	kW	kW	kW	dm ³ /h
22	1,0	4	30 %	97,5 %	34,6	16,3	21,9	1,4	23,3	0,0
22	1,0	4	40 %	100,0 %	38,8	20,5	22,0	5,5	27,5	9,5
22	1,0	4	50 %	100,0 %	43,0	24,6	22,1	9,6	31,7	16,7
22	1,0	4	60 %	100,0 %	47,3	28,8	22,1	13,8	35,9	23,9
22	1,0	4	70 %	100,0 %	51,5	33,0	22,2	18,0	40,2	31,1
22	1,0	4	80 %	100,0 %	55,8	37,3	22,3	22,2	44,5	38,4
22	1,0	4	90 %	100,0 %	60,1	41,5	22,3	26,5	48,8	45,7
22	1,0	4	100 %	100,0 %	64,5	45,8	22,4	30,8	53,1	53,1

Taulukon 4 mukaan latenttienergian teoreettinen maksipotentiaali (RH 100 %) on 30,8 kW, mikä kasvattaa poistoilmasta saatavaa energiamäärää 142 % verrattuna pelkkään sensible-energiaan. Sisäilman kosteuden ollessa 60 % latenttienergiapotentiaali on noin 14 kW, eli 62 % enemmän kuin RT-kortin mukaisissa olosuhteissa.

5.6.1 PILP-esimerkkikohde

Kuvan 23 esimerkkikohteessa on käytössä oleva PILP-, maalämpö- ja kaukolämpöhybridijärjestelmä, joilla on yhteinen lämmönsiirto-putkisto. Lämmönsiirtonesteen lämpötila vaihtelee vuodenajan ja maaperän lämpötilan mukaan. Poistoilman lämmöntalteenotto tapahtuu neulapatterilämmönsiirtimillä, joissa on pieni painehäviö, koska suodattimia ei tarvita. Järjestelmässä ulospuhalluslämpötila ei ole kriittinen, sillä maalämpökaivoista saadaan riittävästi lisäenergiaa. Kun lämpöpumppu ei ole käytössä, poistoilman lämpöä käytetään maalämpökaivojen lataamiseen. Sisäilman lämpötila on lähellä laskennan oletusarvoa +22 °C.



Kuva 23. PILP -poistoilman LTO-yksiköiden toimintalämpötiloja esimerkikohteessa. Kuvakaappaus etähallintajärjestelmästä. [42.]

Laskurin avulla taulukossa 5 tarkastetaan kuvan 23 PILP-järjestelmän poistoilmasta saavat lämmitystehot suhteellisella ilmankosteudella 20 %. Siirtonestettä lämmitetään (LTO 1 ja 2) yhteensä 35,8 kW:n teholla. Ulospuhalluslämpötilat ovat +7,1 °C ja +11,5 °C, joten poistoilmasta ei saada kaikkea potentiaalia

energiaa talteenotettua. Esimerkkikohteen sisäilman suhteellinen kosteus ei ole tiedossa.

Taulukko 5. Kuvan 23 esimerkkikohteen poistoilmasta saatava energia sisäilman suhteellisilla kosteuksilla 20–60 %, todellisilla ilmavirroilla ja ulospuhalluslämpötiloilla.

Laite-tunnus	Sisäilman Lämpötila	Ilma-virta	Ulospuhallus lämpötila	Sisäilman kosteus	Ulospuhallus- ilman kosteus	Entalpia sisäilma	Entalpia ulospuhallus	Lämpöteho (sensible)	Lämpöteho (latentti)	Lämpöteho (yhteensä)	LTO-patterin kondenssi-vesi
	°C	m ³ /s	°C	RH	RH	kJ/kg	kJ/kg	kW	kW	kW	dm ³ /h
LTO2	22,2	0,99	7,1	20 %	53,1 %	30,7	15,4	18,2	0,0	18,2	0,0
LTO1	22	1,38	11,5	20 %	39,0 %	30,4	19,8	17,6	0,0	17,6	0,0
LTO2	22,2	0,99	7,1	30 %	79,6 %	35,0	19,6	18,3	1,5	19,8	0,0
LTO1	22	1,38	11,5	30 %	58,5 %	34,6	23,9	17,7	1,9	19,6	0,0
LTO2	22,2	0,99	7,1	40 %	100,0 %	39,2	23,8	18,3	5,7	24,0	9,8
LTO1	22	1,38	11,5	40 %	77,9 %	38,8	28,1	17,7	7,6	25,3	0,0
LTO2	22,2	0,99	7,1	50 %	100,0 %	43,5	28,1	18,4	9,8	28,2	17,0
LTO1	22	1,38	11,5	50 %	97,4 %	43,0	32,3	17,8	13,3	31,1	0,0
LTO2	22,2	0,99	7,1	60 %	100,0 %	47,8	32,3	18,4	14,0	32,5	24,2
LTO1	22	1,38	11,5	60 %	100,0 %	47,3	36,5	17,8	19,1	37,0	33,0

Sisäilman lämpötilassa +22 °C LTO2:n jäähdytyspatteri saavuttaa kastepisteen ulospuhalluslämpötilassa +7,1 °C, kun ilman suhteellinen kosteus on 40 %, ja LTO1:ssa vastaava kosteus on 60 % lämpötilalla +11,5 °C. Molempien jäähdytyspatterien lämpötilaksi on oletettu +2 °C kuvan 23 TE03:n mukaisesti.

Taulukko 6. Esimerkkikohteen (kuva 23) poistoilmasta saatavan energian määrä arvioitiin sisäilman suhteellisilla kosteuksilla 20–60 %, todellisilla ilmavirroilla ja RT-kortiston mukaisella ulospuhalluslämpötilalla +4 °C.

Laite-tunnus	Sisäilman Lämpötila	Ilma-virta	Ulospuhallus lämpötila	Sisäilman kosteus	Ulospuhallus- ilman kosteus	Entalpia sisäilma	Entalpia ulospuhallus	Lämpöteho (sensible)	Lämpöteho (latentti)	Lämpöteho (yhteensä)	LTO-patterin kondenssi-vesi
	°C	m ³ /s	°C	RH	RH	kJ/kg	kJ/kg	kW	kW	kW	dm ³ /h
LTO2	22,2	0,99	4	20 %	65,8 %	30,7	12,3	21,9	0,0	21,9	0,0
LTO1	22	1,38	4	20 %	65,0 %	30,4	12,2	30,2	0,0	30,2	0,0
LTO2	22,2	0,99	4	30 %	98,7 %	35,0	16,5	22,0	1,5	23,5	0,0
LTO1	22	1,38	4	30 %	97,5 %	34,6	16,3	30,3	1,9	32,2	0,0
LTO2	22,2	0,99	4	40 %	100,0 %	39,2	20,7	22,1	5,7	27,7	9,8
LTO1	22	1,38	4	40 %	100,0 %	38,8	20,5	30,4	7,6	38,0	13,1
LTO2	22,2	0,99	4	50 %	100,0 %	43,5	24,9	22,2	9,8	32,0	17,0
LTO1	22	1,38	4	50 %	100,0 %	43,0	24,6	30,5	13,3	43,8	23,0
LTO2	22,2	0,99	4	60 %	100,0 %	47,8	29,1	22,2	14,0	36,3	24,2
LTO1	22	1,38	4	60 %	100,0 %	47,3	28,8	30,6	19,1	49,7	33,0

Taulukon 6 mukaan laskelmalla ulospuhalluslämpötila +4 °C:seen lämmöntalteenottopatterista saatava tehopotentiali sisäilman suhteellisella kosteudella 20 % on 52 kW, eli noin 45 % jää lämmöntalteenoton potentiaalista käyttämättä. Maalämpökaivojen kiertopiiriin yhdistettyä poistoilmanvaihdon lämmöntalteenottoa kannattaa käyttää siten, että lämpöpumpulle menevän liuksen lämpötila pysyy mahdollisimman lämpimänä. Näin lämpöpumpun hyötysuhde pysyy mahdollisimman korkeana.

5.6.2 PILP-järjestelmän energiapeitto

VTT:n tekemän 13 kohteen tutkimuksen perusteella PILP-järjestelmien energianpeittokeskiarvo oli noin 50 % asuinkerrostaloissa ja energiapeiton vaihteluväli noin 40–70 %. Kytkentätyypillä ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta lämpökertoimeen. Todennäköisesti suurin syy sen vaihteluun on lämmitysjärjestelmien lämpötilavaihteluissa. [21, s. 25–27.]

Poistoilmalämpöpumppua voidaan käyttää aina rakennusten lämmitykseen ja käyttöveden lämmityksen kannattavuus pitää tutkia erikseen. [20, s. 8.]

5.6.3 PILP-energiapeittolaskuri

Työssä kehitettiin laskuri, joka mahdollistaa PILP-järjestelmän energiapeiton laskemisen poistoilmamäärän ja vuotuisen lämmitysenergian perusteella. Energiapeiton avulla voidaan arvioida hankkeen toteutettavuutta. Kannattavuus täytyy arvioida erikseen. Taulukoiden 4–5 laskurien avulla voidaan tarkastella käytettävissä olevan ilmavirran sisältämää energiaa (kW), jota voidaan käyttää poistoilmasta saatavan lämmitystehon arviointiin.

Kohteen tiedot ovat seuraavat:

- Sisäilman lämpötila +22 °C
- Ulospuhalluslämpötila +4 °C
- Ilmansuhteellinen kosteus (RH) 30 %

- Asuinpinta-ala 3 102 m²
- Asuntoja 56
- Normaali-ilmanvaihto:
 - 20 l/s asunto (1120 l/s) tai
 - Ilmavaihtokerron 0,35 per asuinpinta-ala (1 090 l/s)
- Vuotuinen lämmönkulutus 500 MWh/a
 - Poistoilmasta saatava teho 26,2 kW (RH 20%)

Taulukko 7. Energiapietolaskuri PILP-järjestelmiin.

Energian kulutus per vuosi	PILP teho
500	26,2
MWh	

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	Energian kulutus- jakauma	Päiviä/kk	Tunnit/kk	Energian kulutus (kk)	COP	LP-sähkö- teho	Max LP-tuotto per kk	Energia- peitto kuukausittain	LP-tuotto per kk
	%	d	h	kWh		kW	MWh	%	MWh
Tammikuu	14,5 %	31	744	72,5	3,56	7,4	19,5	26,9 %	19,5
Helmikuu	13,5 %	28	672	67,5	3,56	7,4	17,6	26,1 %	17,6
Maaliskuu	12,6 %	31	744	63	3,56	7,4	19,5	30,9 %	19,5
Huhtikuu	9,5 %	30	720	47,5	3,56	7,4	18,9	39,7 %	18,9
Toukokuu	5,5 %	31	744	27,5	3,56	7,4	19,5	70,9 %	27,5
Kesäkuu	2,8 %	30	720	14	3,56	7,4	18,9	134,7 %	14,0
Heinäkuu	2,5 %	31	744	12,5	3,56	7,4	19,5	155,9 %	12,5
Elokuu	2,7 %	31	744	13,5	3,56	7,4	19,5	144,4 %	13,5
Syyskuu	4,9 %	30	720	24,5	3,56	7,4	18,9	77,0 %	24,5
Lokakuu	8,0 %	31	744	40	3,56	7,4	19,5	48,7 %	19,5
Marraskuu	10,5 %	30	720	52,5	3,56	7,4	18,9	35,9 %	18,9
Joulukuu	13,0 %	31	744	65	3,56	7,4	19,5	30,0 %	19,5

225,3
Yhteensä

Energia- peitto
45 %

- (1) KL-energia, kk-kohtainen keskimääräinen suhteellinen tarve. Lähde: Energiateollisuus Ry
- (2) Kalenterikuukaudenpäivät
- (3) Päivät x 24
- (4) Vuosikulutus (MWh) x kuukausiosuus kulutuksesta (%)
- (5) Seurantakohteiden keskiarvo COP, kohta 6.5.2
- (6) Poistoilmasta saatava lämmitysteho (kW) / COP
- (7) Tunnit/kk x COP x Lämpöpumpun teho (kW)
- (8) LP-tuotto (MWh) / Lämmitystarve (kk)
- (9) LP-tuotto, joka on enintään kiinteistön lämmitystarpeen suuruinen

Laskurilla voidaan arvioida poistoilman lämmöntalteen energiapotentiaalia kuukausitasolla. Teoreettisella enimmäisenergiapitoa 45 % kohde vaikuttaa olevan kannattava toteuttaa. Kannattavuuden ratkaisee investoinnin suuruus. Käyttöveden tekemisen kannattavuus lämpöpumpulla täytyy arvioida erikseen. Taulukon 7 mukaisesti energiaa on saatavilla saman verran ympäri vuoden, kun laskuri ei ota RT-kortiston ohjeistuksen mukaisesti huomioon latenttienergiaa [20]. Täyden tehon mitoituspiste on laskettava rakennuskohtaisesti. Latenttienergiaa voidaan hyödyntää taulukon 6 mukaisesti sisäilman suhteellisen kosteuden ollessa yli 30 %.

5.6.4 PILP-järjestelmien energiansäästöpotentiaali

VTT on arvioinut, että poistoilmalämpöpumpuilla on Suomessa pitkällä aikavälillä noin 2 700 GWh:n potentiaali kaukolämmön kulutuksen vähentämisessä. Lämpöpumppujen sähkönkulutus on tästä noin 800 GWh. [21.]

Kuvassa 24 on esitetty koneellisella poistoilmanvaihdolla varustettujen asuin-kerrostalojen kaukolämpöenergian säästöpotentiaali PILP-järjestelmien avulla. Vaihtoehdot perustuvat oletukseen, että poistoilmanlämmöntalteenotto vähentää rakennuskohtaista kaukolämpöenergian tarvetta 50 %. [21.]

Skenaario	Osuus kokonaispotentiaalista	Kaukolämmön kulutuksen vähenemä ¹ (GWh)	Osuus kaukolämmön kokonaiskulutuksesta ²
Vaihtoehto A	10 %	334	1.1 %
Vaihtoehto B	20 %	668	2.3 %
Vaihtoehto C	40 %	1 337	4.5 %
Vaihtoehto D	80 %	2 674	9.0 %

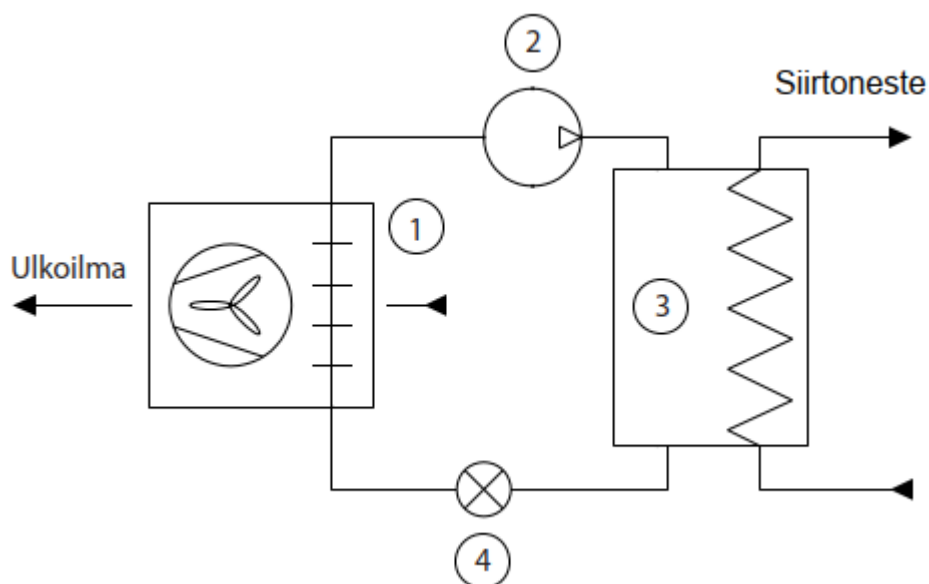
Kuva 24. Skenaariot PILP-järjestelmien kokonaissäästöpotentiaalista [21].

6 Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmien toiminnan tarkastelu

6.1 Toimintaperiaate

Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmä (IVLP) toimii samalla periaatteella, kun maa- ja poistoilmalämpöpumppujärjestelmät. Lämpöenergiaa siirretään matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan. Lämmönlähteenä on ulkoilma, josta saatava energian määrä ja hyötysuhde (COP) vaihtelee ulko-olosuhteiden mukaan. [43, s. 2.]

Kuvan 15 komponentit ovat (1) höyrystin, (2) Kompressori, (3) Lauhduttimessa ja (4) Paisuntaventtiili.



Kuva 25. IVLP:n kylmäpiirin pääosat mukailtuna [43, s. 4].

6.2 Tutkittavat kohteet ja kohdetiedot

Tutkimuksen kohteena oli asuinrakennuksissa toiminnassa olevaa 14 ilmavesilämpöpumppujärjestelmää. Lämpöpumpuilla tuotetaan rakennuksiin lämmintä käyttövettä ja lämmitystä. Kaikissa rakennuksissa on ensisijaisena lämmitysmuotona kaukolämpö. Energiahanke suunnittelussa asetettuja lämpökertoimia

(COP) ei kohteissa saavuteta ja energiaperitot jäävät tavoitearvoista. Näin ennakoitua säästöjä jäävät odotettua pienemmiksi. Tutkimuksessa analysoidaan järjestelmien toimintaa, pyritään selvittämään poikkeamien syitä sekä tehostamaan laitteistojen suorituskykyä. Kohteet ovat etävalvonnassa, rakennusautomaation käyttöjärjestelmänä on DEOS.

Taulukko 8. Kohdetiedot tutkittavista asuinkerrostaloista [44, Liite 1, s. 3].

Rakennus	Tyyppi	Rakennusvuosi	Huoneistoala	Lämmitystekohde	Lämminkäyttövesiteho
			m ²	kW	kW
Kohde 1	Pistetalo	1965	1197	120	210
Kohde 2	Pistetalo	1965	1197	120	210
Kohde 3	Pistetalo	1965	1197	100	210
Kohde 4	Pistetalo	1965	1197	100	210
Kohde 5	Pistetalo	1965	1219	100	210
Kohde 6	Pistetalo	1965	1219	120	210
Kohde 7	Nauhaikkunalamelli	1966	3187	260	330
Kohde 8	Nauhaikkunalamelli	1965	3199	260	330
Kohde 9	Atrium-talo	1965	1069	100	220
Kohde 10	Atrium-talo	1965	1300	100	220
Kohde 11	Lamellitalo	1966	2746	230	320
Kohde 12	Lamellitalo	1966	7462	130	200
Kohde 13	Lamellitalo	1965	3689	310	340
Kohde 14	Lamellitalo	1965	2377	200	330

Taulukossa 8 on esitetty tutkimuskohteiden perustiedot ja lämmitystekohde tarpeet.

6.3 Energiatehokkuusselvitys

Energiatehokkuusselvityksessä 15.5.2020 mallinnettiin IDA ICE-energiasimulointiohjelmalla kohteet 3 ja 13 sekä kalibroitiin malli vastaamaan mahdollisimman tarkasti vastaamaan todellista energian kulutusta. Energiatehokkuustoimenpiteille tehtiin monitavoiteoptimointi MOBO-ohjelmalla. Liitteen 7 mukaisesti optimoinnin tuloksena molempiin kohteisiin valittiin päälämmitysmuodoksi ilma-vesilämpöpumppu (IVLP) ja kaukolämpö priimaukseen. Takaisinmaksuajaksi saatiin 8,4 vuotta. Järjestelmävaatimukseksi asetettiin, että IVLP pystyy lämmitämään käyttövedestä mahdollisimman suuren osuuden.

6.4 Energiahankesuunnitelma

6.4.1 Ilma-vesilämpöpumppujen asennus- ja toimintavaatimukset

Energiahankesuunnitelman 18.12.2020 pääasiallisina lähtötietoina toimivat energiakatselmusraportti (29.11.2019) ja energiatehokkuusselvitys (15.5.2020), joiden mukaan energiatoimenpiteeksi valikoitui ilma-vesilämpöpumpun asentaminen kaukolämmön rinnalle ja aurinkopaneelit lamellitaloihin. [44; s. 4.]

Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmän mitoituksen lähtötietoina käytettiin Visma Tampuuri -kiinteistöhallintajärjestelmästä saatuja rakennusten lämmityksen ja vedenkulutuksen tuntisarjoja vuosilta 2016–2018. Lisäksi huomioitiin rakennusten lämmityspiirien tavoitelämpötilat eri ulkolämpötiloissa sekä lämpöpumppuvalmistajan ilmoittamat laitteiden toiminta-arvot. Lämpimän käyttöveden osuudeksi arvioitiin olevan Motivan ohjeiden mukaisesti 40 % kokonaisvedenkulutuksesta. [44; s. 5.]

Energiahankesuunnitelman osana tehtiin talotekninen laiteluettelo sekä laitesijoituspiirustukset ja periaatekaaviot lämpöpumppujen kytkennästä nykyiseen kaukolämpöjärjestelmään [44; s. 16].

Ilma-vesilämpöpumppujen (IVLP) asennukselle ja toiminnalle on asetettu seuraavat tavoitteet [44; s. 17–18.]:

Asennus ja kytkentä

Kaikkiin rakennuksiin asennetaan ilma-vesilämpöpumppu (IVLP) nykyisen lämmönjakokeskuksen rinnalle hankesuunnitelman periaatekaavion mukaisesti. Kytkennässä otetaan huomioon energiyhtiön vaatimukset hybridijärjestelmille, ja IVLP liitetään rinnakkain olemassa olevan lämmitysjärjestelmän kanssa.

Toimintavaatimukset

IVLP-järjestelmä hyödyntää kylmäainepuolella economizer-kytkentää, mutta Swegonin mukaan sen vaikutus COP-arvoihin on tässä tapauksessa vähäinen [48]. Järjestelmän on kyettävä toimimaan haastavissa ulkolämpötiloissa: -20 °C :ssa sen tulee tuottaa $+55\text{ °C}$:n menovettä ja -15 °C :ssa $+60\text{ °C}$, molemmissa tapauksissa COP-arvon ollessa 2,1–2,3.

Lämpötilan hallinta

Ulkolämpötilan ollessa -15 °C , kaukolämpösiirtimestä on tuotettava noin $+15\text{–}20\text{ °C}$ nykyistä säätökäyrää lämpimämpää vettä, jotta patteriverkoston menolämpötila vastaa asetettua arvoa. Sen sijaan tilanteissa, joissa IVLP ei ole toiminnassa (ulkolämpötilan laskiessa alle $-15\text{...}-20\text{ °C}$), ei kaukolämmöltä tarvitse tuottaa säätökäyrää korkeampaa lämpötilaa. Tämä muutos on huomioitava automaatio-ohjelmoinnin suunnittelussa.

Laitteiston sijoitus ja verhoilu

IVLP-yksiköt sijoitetaan rakennusten piha-alueille lämmönjakuhuoneiden läheisyyteen, ja muut järjestelmän komponentit asennetaan lämmönjakuhuoneisiin. Ulkoyksiköt verhoillaan esimerkiksi puuverhouksella, joka toimii äänieristyksenä ja näkösuojana.

Äänitason hallinta

Ulkoyksiköiden sijoittelussa pyritään vähintään 10 metrin etäisyyteen ikkunoista ja parvekkeista, jotta äänitaso pysyy hyväksyttävällä tasolla. Kondenssi- ja sulatusvedet johdetaan hallitusti pois esimerkiksi imeytyskaivon tai kivipesän kautta.

6.4.2 Laitteistomitoitus

Energiahankesuunnitelmassa on esitetty kohdekohtaiset tavoitteelliset ilma-vesilämpöpumppujen tehot, energiaperitot, tehopeitot, lämpöpumppujen tuottama lämpöenergia vuodessa (MWh) ja IVLP:n sähkönkulutus (MWh). [44, s. 6.]

Tarkasteltujen IVLP-laitteistojen tehot vaihtelevat kohteen tehontarpeen mukaan välillä 45–125 kW. Kokonaistehotarve perustuu toteutuneeseen kaukolämpöenergian kulutukseen. Laskennallinen energiaperitto on keskimäärin 91 % ja tehopeitto 52 %. Kohteisiin on valittu liitteen x mukaiset Swegon Zeta Rev HP XT -ilma-vesilämpöpumput, joiden laitesijoitukset on esitetty rakennuskohtaisissa piirustuksissa.



Kuva 26. Swegon BlueBox Zeta HP XT ilma-vesilämpöpumppu [46].

Lämpöpumput on valittu taulukon 9 tehomitoituksen ja EN 14511 -standardin mukaisiin esitteen tehoarvoihin perustuen. Standardin mukaiset tehoarvot saavutetaan testiolosuhteissa, joissa ulkolämpötila on +7 °C ja lämpöpumpun lauhduttimella lämmitetään siirtonesteinä oleva vesi +40–45 °C:seen. Valmistajan

liitteen 5 teknisten tietojen mukaan lämpöpumppujen SCOP-arvo on mallin mukaan 3,32–3,50. Esitettyjen lukujen perusteella laskennassa on epäloogisuuksia. Muutokset ovat esitettynä taulukossa 9.

Taulukko 9. IVLP mitoitus tiedot, muokattuna, lisätty SCOP [44, s. 6].

Rakennus	KL-kulutus [MWh]	KL-teho [kW]	IVLP-teho [kW]	IVLP-energiapeitto [%]	Tarkastettu IVLP-energiapeitto [%]	Energiapeiton erotus [%]	IVLP-tehopeitto [%]	Tarkastettu IVLP-tehopeitto [%]	Tehopeiton erotus [%]	IVLP:n tuottama lämpö [MWh]	IVLP:n sähkönkulutus [MWh]
Kohde 1	227	90	45	92 %	83 %	-9 %	50 %	50 %	0 %	188	58
Kohde 2	270	110	50	92 %	83 %	-9 %	55 %	45 %	-10 %	225	68
Kohde 3	218	89	45	94 %	84 %	-10 %	60 %	51 %	-9 %	183	57
Kohde 4	224	82	40	92 %	82 %	-10 %	55 %	49 %	-6 %	184	56
Kohde 5	562	210	100	92 %	83 %	-9 %	57 %	48 %	-9 %	464	142
Kohde 6	280	98	45	89 %	80 %	-9 %	48 %	46 %	-2 %	223	68
Kohde 7	332	118	55	90 %	81 %	-9 %	50 %	47 %	-3 %	269	82
Kohde 8	689	240	100	85 %	76 %	-9 %	42 %	42 %	0 %	527	158
Kohde 9	227	90	45	93 %	84 %	-9 %	65 %	50 %	-15 %	191	58
Kohde 10	289	116	50	91 %	81 %	-10 %	49 %	43 %	-6 %	234	71
Kohde 11	723	270	125	91 %	81 %	-10 %	53 %	46 %	-7 %	586	179
Kohde 12	255	98	45	91 %	82 %	-9 %	47 %	46 %	-1 %	208	63
Kohde 13	477	175	80	91 %	82 %	-9 %	50 %	46 %	-4 %	389	118
Kohde 14	787	253	110	85 %	76 %	-9 %	41 %	43 %	2 %	598	179
Keskiarvo	397	146	67	91 %	81 %	-9 %	52 %	47 %	-5 %	4470	1358

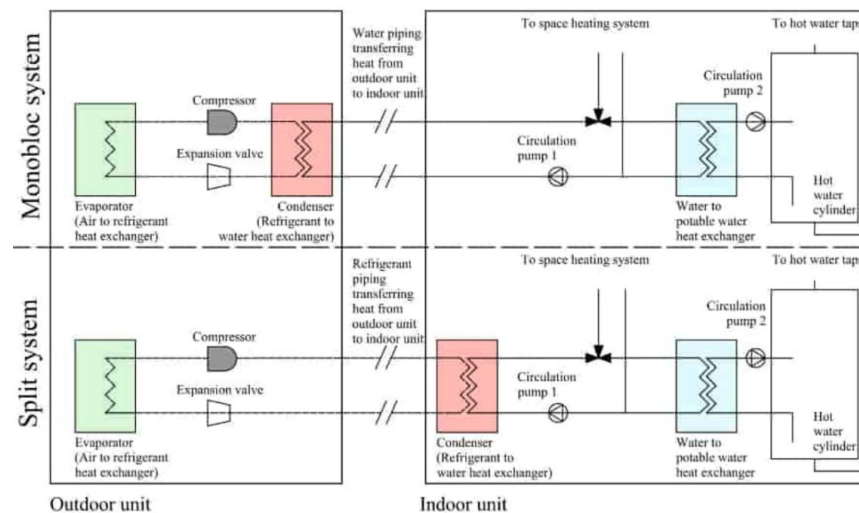
Taulukkoon 9 on lisätty IVLP-energiapeitto ja IVLP-tehopeitto vastaamaan taulukon kulutus- ja tehotietoja [44, s. 6].

Alinta mitoituslämpötilaa, jolla laitteisto toimii täydellä teholla, ei ole esitetty. Taulukossa ei ole huomioitu, että IVLP:n tuottama teho vaihtelee käyttötilanteissa ulkolämpötilan ja halutun lämpötilatason mukaan.

6.4.3 Periaatteellinen kytkentäkaavio

IVLP-laitteistot ovat piha-alueelle ja lämmönjakohuoneeseen sijoitettuja Monoblock-järjestelmiä. Lämpöpumpun lauhduttimelta lämpö siirtyy 30 %:n glykoli-vesiliuosputkistolla lämmönjakohuoneeseen ja levylämmönsiirtimeltä lämmitysjärjestelmään. IVLP:n mitoituslämpötilaero on 5 °C ja toimintalämpötilat +60–55

°C. Lämmönjakohuoneessa sijaitsevan välilämmönsiirtimen lämpötilaero on 5 °C ja toimintalämpötilat +58–53 °C. Siirtimen lämpöhäviö on 2 °C. Toimintaselostuksen mukaan käyttövedtä varastoidaan käyttövesivaraajaan. Varaaja on jaettu kahteen osaan lämmöntasauslevyllä, jonka alapuolella lämmitysverkoston lämpötilat ovat +30–55 °C ja yläpuolella +50–60 °C. Lämmitysverkoston lämpötilaero on 20 K varaajalla. Järjestelmäkuvaus on yleisluonteinen, kuten yleensä hankesuunnitteluvaiheessa.



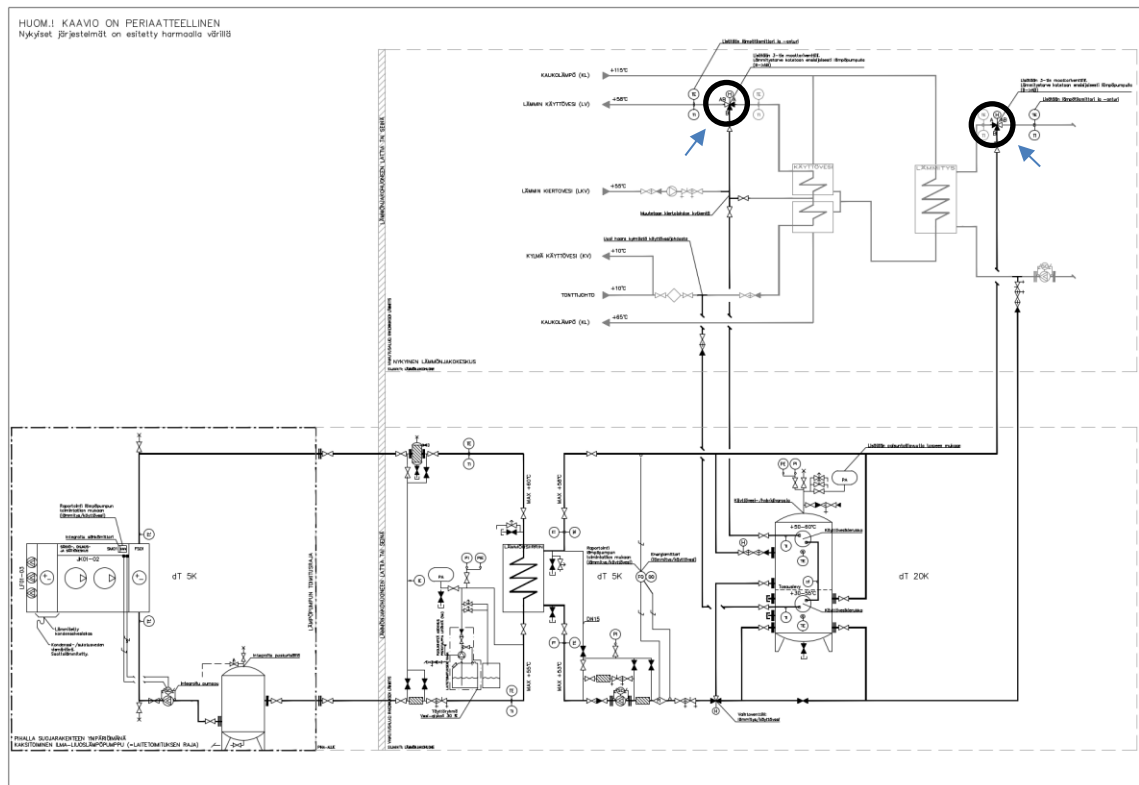
Kuva 27. Tyypillisten Split- ja Monoblock-ilma-vesilämpöpumppujärjestelmien pääkomponentit [25].

Kytentäkaaviota tarkasteltaessa havaittiin useita mitoituksessa huomioon otettavia siirtohäviöitä. Siirtonesteinä käytetään glykolivesiliuosta, jonka lämmönsiirto-ominaisuudet ovat vettä heikommat. Siirtoverkosto ulkoyksiköltä lämmönjakohuoneeseen kasvattaa kokonaislämpöhäviötä. Varaajan käyttöveden lämmityskierukka aiheuttaa siirtohäviön. Patteriverkoston ja lämmitysjärjestelmän kiertopumput on kytketty sarjaan, mikä nostaa verkoston virtaamaa ja painetta.

Nykyiset kaukolämpölaitteistot on säilytetty ja kytkentöjä on muokattu lisälämmönlähteelle soveltuvaksi. Kuvassa 28 on esitetty lämpimään käyttöveteen lisätty 3-tieventtiili, jonka kautta lämminvesivaraajalta tuleva lämmitetty käyttö-

vesi voidaan johtaa lämpimän veden menoon. Kytkentä ei ole Helen ohjeistuksen mukainen, koska siitä puuttuu yksisuunta- ja säätöventtiilit. Lämminvesikierrosta saa johtaa 3-venttiilin kautta enintään 25 % [47].

Rakennuksien lämmitysjärjestelmiin on lisätty 3-tieventtiilit, joiden avulla lämpöpumpulta tuleva energia siirretään radiaattoriverkostoon. Lämmitysverkoston ja lämmityslaitteiston pumput ovat kytkettyinä sarjaan. Tämä aiheuttaa pumppauspaineen nousua lämpöjohtoverkostossa ilman ohjelmallista säätöä ja mahdollisia äänihaittoja lämmitysverkostossa. Paineen nousu suurinta, kun lämmitys tehdään kokonaan lämpöpumpuilla.



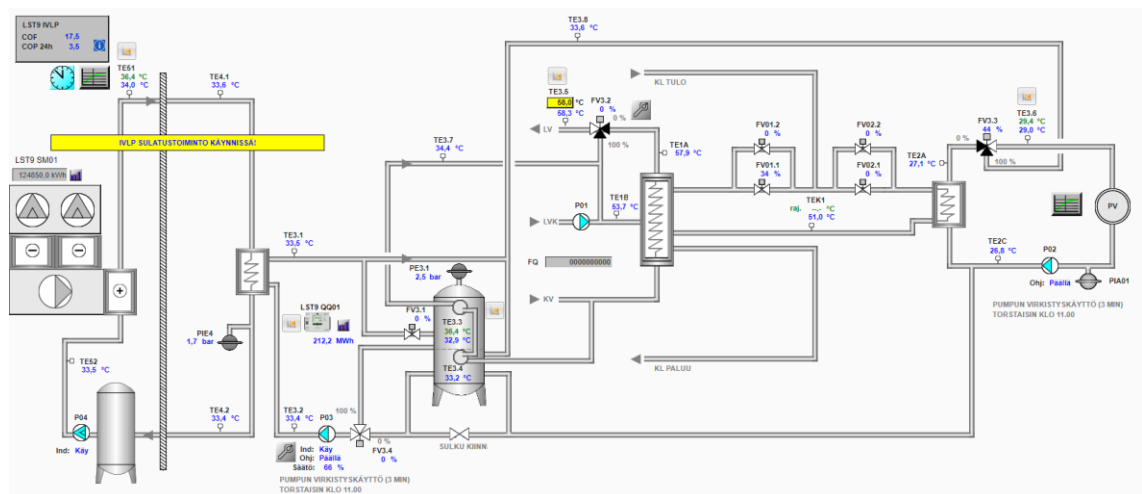
Kuva 28. Energiahanke suunnitelman IVLP-hybridijärjestelmän kytkentäkaavio, johon 3-tieventtiilit on merkitty [44; piirustus L16000].

6.5 Toteutussuunnittelu ja urakan kytkentäkaavio

Energiahankesuunnitelman kytkentäkaavioon on lisätty toteutussuunnittelussa toimintaselostukset ja tarkat mitoitukset. Toimintaperiaatteeseen tai kytkentöihin

ei ole tehty muutoksia. Myös mitoituslämpötilat ovat samat, kts. huomiot kohta 7.4.3. IVLP-laitteistolla lämmitetään käyttövedtä ja lämmitysverkostoa. Kytkentäkaavio on esitetty liitteessä 2.

Etähallintajärjestelmän (DEOS) kytkentäkaaviota on yksinkertaistettu verrattuna suunnitelmiin. Siinä on esitetty toimintaperiaate, toimilaitteet, säätölaitteet, termostaatti ja pumput.



Kuva 29. Etähallintajärjestelmä lämmönjakohuoneen käyttöliittymä [48].

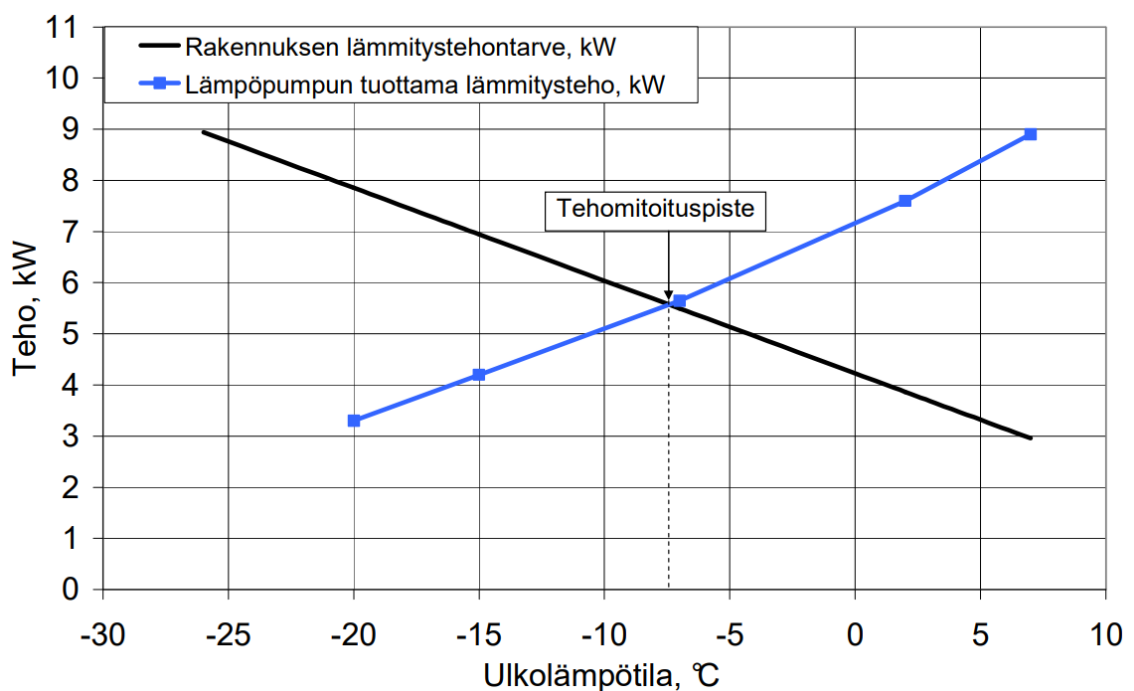
6.6 Ohjearvot lämpöpeitolle ja SCOP-arvolle

IVLP-järjestelmälle on määritetty ohjearvot energiapeitolle ja lämpökertoimille sekä käyttöveden että kiinteistön lämmityksen osalta eri mitoituslämpötiloissa. Lämpöpumppujen alimmaksi toimintalämpötilaksi on oletettu -20 °C , kuten energiahankesuunnitelmassa. Ilma-vesilämpöpumput lämmittävät rakennuksia ja käyttövedtä vuorotellen, etusijalla käyttöveden lämmitys. Näin on myös tutkitavalla laitteistolla. Laskentaohjeen ohjearvot tutkittaville kohteille ovat energiapittoon 57 %, SCOP on lämmitykselle 2,2 ja käyttövedelle 1,8. [49, liite. 2.]

6.7 Täyden tehon mitoitus

IVLP:n täyden tehon mitoituksen ulkolämpötilalle ei ole määräyksissä tai ohjeistuksissa tarkkoja arvoja, ne määritetään järjestelmäkohtaisesti. Lämpöpumpun ympäristöministeriön laatimassa laskentaoppaassa esimerkkitaulukon oletusarvo (1,0) vastaa lämpöpumpun täyttä tehomitoitusta noin -5 °C :n ulkolämpötilassa lämmitysverkoston menoveden lämpötilan ollessa $+35\text{ °C}$. [49, liite. 2.]

Kuvan 30 mukaisesti ilmavesilämpöpumpun teho ja rakennuksen tarvitsema lämmitysteho menevät vastakkain suuntiin suhteessa ulkoilman lämpötilaan. Käyrien leikkauskohta on tehomitoituspiste, jossa kaikki tarvittu lämmitysteho voidaan tuottaa lämpöpumpulla. Omakotitalossa tehomitoituspisteeksi on esitetty $-7,5\text{ °C}$. [49.]



Kuva 30. IVLP:n täyden tehomitoituspiste omakotitalossa ulkolämpötilan ja tehon suhteessa [49].

6.8 Valitut Ilma-vesilämpöpumput ja laitevalmistajan tiedot

Kohteisiin on asennettu IVLP:t, jotka ovat tyyppiä Swegon Zeta HP XT 9.2 LN VEM, 1PS, ainoastaan teho vaihtuu kohdekohtaisesti. Kylmäaineena on kaksikomponenttinen R410A, jossa on yhdistettynä R32 (50 %) ja R125 (50 %) kylmäaineet. Laitemallin lyhenteet ovat seuraavat [50]:

- HP (Heat Pump), lämpöpumppu
- XT (Extreme), tuottaa +65 °C vettä
- 9.2 Mallin tehotunnus, muuttuu laitteistokohtaisesti
- LN (Low Noise) – matalampi melutaso verrattuna perusmalli
- VEN Puhallintyyppi, joka perusmallia tehokkaampi
- 1PS, 1 hydraulinen moduuli, jossa on yksi pumppu ja puskurisäiliö

Tutkimuksessa oli käytettävissä laitevalmistaja Swegon toimittamat normin EN 14511–2022 mukaiset laitteistokohtaiset laitetiedot (taulukko 10) ja COP-arvot on esitetty ulko- ja toimintalämpötiloissa 5 °C välein. Väliarvot on laskennoissa iteroitu. Normin mukaiset lämpökertoimet sisältävät sulatuksen laskennallisen vaikutuksen suoritusarvoihin.

Taulukko 10. Swegon Zeta XT 9.2 LN VEM, 1PS IVLP:n valmistajan toimittamat kohdekohtaiset laitetiedot, kun lämpöpumppu tuottaa +60 °C menovettä [51].

ZETA HP XT 9.2 LN VEM, 1PS

	Menoveden lämpötila	Lämmitys-teho	Kompressorien sähköteho	Kokonais-sähköteho	COP**
		kW	kW	kW	
-15 °C, 87 %	+55 °C*	62	31,6	36,8	1,7
-10 °C, 87 %	+60 °C	69,8	35,8	40,9	1,7
-5 °C, 87 %	+60 °C	77,6	36,3	41,4	1,9
0 °C, 87 %	+60 °C	85,3	36,9	41,9	2,0
+5 °C, 50 %	+60 °C	98,3	37	42,3	2,3
+10 °C, 50 %	+60 °C	108	37,4	42,7	2,5
+15 °C, 50 %	+60 °C	116	37,6	43	2,7
+20 °C, 50 %	+60 °C	125	38	43,2	2,9
+ 25 °C, 50 %	+60 °C***	131	38	41,1	3,2

*60 °C on toiminta-alueen rajalla

** Lämmitysteho/ kokonaissähköteho

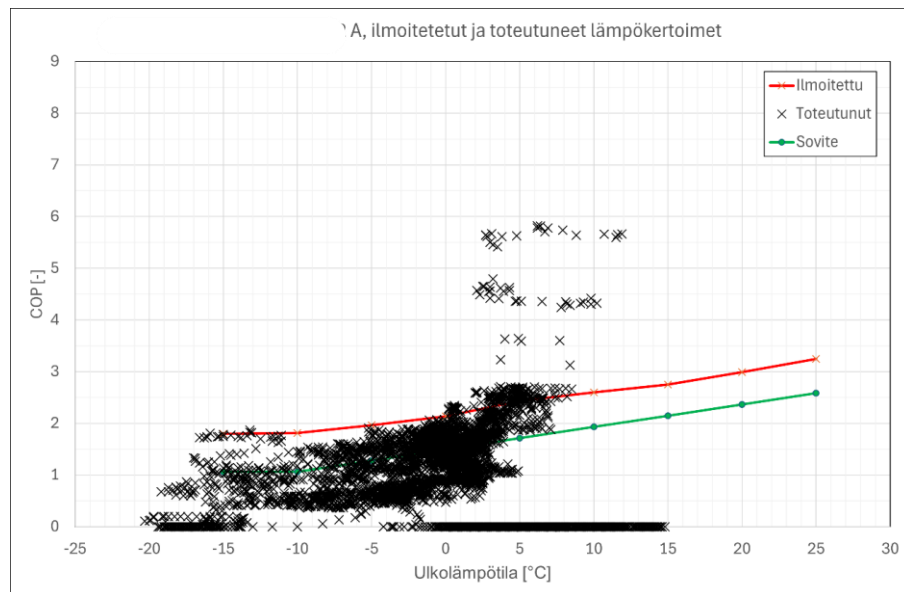
*** Dt 6°C

Tehotiedot on ilmoitettu lämpötilaerolla Δt_1 6 °C, kun laitos mitoitettu kytkentä-kaavion mukaan Δt_2 5 °C. Kaavan 6 mukaan saadaan laskettu tehon muutos, kun massavirta ja ominaislämpökapasiteetti pysyvät vakoina. Tehon muutos on $5/6 = 0,83$, jolloin lämpöpumpun teho pienenee 16,7 %. Massavirtaa lisäämällä voidaan kompensoida kiertonesteeseen lämpötila. Valmistaja ilmoitti, että kytkentä-kaavion lämpöpumppulaitteistoon integroitu kiertopumppu P04 käy vakiovirtaamalla.

6.9 Toiminnan tutkiminen

Ilmavesilämpöpumpun toiminnan simulointiin tehtiin Excel -työkalu, jolla pystyttiin arvioimaan tehotuotto ulkolämpötilan suhteessa ulkolämpötilaan. Simuloinnissa on otettu huomioon, lämpötilan pysyvyyskäyrä (TRY2012) tunneittain as-teen tarkkuudella, ulkolämpötila, kiinteistön lämmityskäyrä, lämpöpumpun teho-

tuotto ulkolämpötilan ja tuotetun nesteen lämpötilan suhteessa sekä rakennuksen lämpötarve eri ulkolämpötiloilla. Järjestelmätiedot, kuten lämmityskäyrä ja COP-arvot saatiin käyttöjärjestelmän trendiajoista lisäämällä sovitteet. Mittaus- tuloksista poistettiin selkeästi poikkeavat arvot. Laitteistolla ei vielä ole yhtään kokonaista toimintavuotta takana, jonka jälkeen mittausdatan luotettavuus paranee jatkossa toimintapisteisiin. Järjestelmän kokonaishyötysuhde saadaan laskettua sähköenergiankulutuksesta ja lämpöpumpulla tuotetusta lämpöenergiasta.



Kuva 31. Kohteen 2 IVLP:n valmistajan antamat ja toteutuneet lämpökertoimet sekä sovite. COP-arvot ovat esitetty lämpötilan asetusarvolle +60 °C, lukuun ottamatta -15 °C ulkolämpötilaa, jolloin asetusarvo on +55 °C [52].

Kuvan 31 sovitteen lämpökertoimien yhteenveto on esitetty taulukossa 11.

Ekstrapoloitu sovitteen osa on jätetty taulukosta pois epäluotettavuuden vuoksi.

Kohteessa on Swegon Bluebox Zeta Rev HP XT 4.2 ilma-vesilämpöpumppu.

Taulukossa on valmistajan ilmoittamat ja toteutuneet tehot ja COP-arvot.

Taulukko 11. COP-arvot kuvan 31 sovitekäyrän mukaan [52].

Ulkolämpötila	Asetuslämpötila	P_L	P_S	$COP_{lm.}$	COP_{Sovite}	COP_{Ero}	
[°C]	[°C]	[kW]	[kW]	[-]	[-]	[-]	[%]
-15	55	30,5	17,0	1,8	1,06	-0,73	41
-10	60	34,6	19,1	1,8	1,06	-0,75	41
-5	60	38,3	19,5	2,0	1,28	-0,69	35
0	60	42,7	20,0	2,1	1,49	-0,64	30
+5	60	49,6	20,4	2,4	1,71	-0,72	30
+10	60	54,0	20,8	2,6	1,93	-0,67	26

Taulukon 11 perusteella toiminnallinen COP_{Sovite} on keskimäärin noin 34 % pienempi kuin laitevalmistajan ilmoittama vertailuarvo. Kohteessa 2 lämpöpumpun käyttö ei ole kannattavaa ulkolämpötilan laskiessa alle -5 °C , sillä lämpökerroin (COP) laskee tällöin lähelle yhtä. Todellisissa käyttöolosuhteissa ($-5\dots+10\text{ °C}$) mitattu COP on noin 30 % valmistajan ilmoittamaa standardiarvoa alhaisempi.

Käyttöveden lämmitys rajattiin tutkimuksesta pois, koska sen tekemisen todettiin olevan tutkittavilla laitteistolla kannattamatonta järjestelmän alhaisen tehopeiton vuoksi lämmityskaudella ja kesällä kaukolämmön edullisen hinnan vuoksi. Vaikutus tehopeittoon saadaan tarvittaessa arvioitua laskennallisesti Motivan ohjeen mukaisesti olettamalla lämpimän käyttöveden kulutuksen olevat 40 % kokonaisvedenkulutuksesta.

6.10 Toteutunut lämpöpeitto ja teho

Laitteistojen toimintaa on seurattu tammi–joulukuussa 2023. Etäkäyttöjärjestelmästä on saatavilla laskentaa varten tarvittavat trenditiedot. Data on pääosin katkonaista käyttökatojen ja huoltojen vuoksi. Tarkempaa tutkimusta varten valittiin yksi kohde, josta oli saatavilla eniten käyttötietoa. Kaikissa kohteissa toimintaperiaate on sama. Seurantajakso ei ole riittävä lopullisten johtopäätösten tekemiseen, mutta sen avulla voidaan arvioida ja tehostaa laitoksien toimintaa. Keskimääräinen toteutunut COP on liitteen 3 mukaisesti 1,80 ja energiapeitto 38 %. Energiahankesuunnitelman arvot ovat 3,28 ja 91 %. COP-arvo jää asete-

tusta tavoitteesta 45 % ja lämpöpeitto 58 %. Lämpöpumpuissa on ollut käyttöönoton tuomia toimintakatkot, komponenttivikoja yms., joten käytössä oleva dataa on muokattu epäjohdonmukaisuuksia poistamalla. Tutkimuksessa päästiin kuitenkin riittävään tarkkuuteen toiminnan arviointia varten. Lopputuloksissa on huomioitava, että järjestelmästä saatavat COP-arvot todellisuutta jonkin verran parempia, koska lämpöpumppu ottaa sulatusenergian rakennuksen lämpöverkostosta ja energia tulee kaukolämmöstä. Lämpöpumppujärjestelmän energiamittari pysähtyy nolnaan, kun sen pitäisi mennä negatiiviseksi sulatuksen aikana. [52.]

6.11 Järjestelmän tarkastus

6.11.1 Ilma-vesilämpöpumppujen käyttöönotto

Lämpöpumppujärjestelmät on otettu käyttöön 3.2.2022–3.2.2023 välisenä aikana. Lämpöpumppujen käyttöönoton ja käynnistykset on dokumentoinut urakoitsijan toimeksiannosta laitetoimittaja Swegon, liite 8. Ulkolämpötilat ovat vaihdelleet koekäytön aikana +15,5 °C ja –3,8 °C välillä. Lämmönsiirtonesteen lämpötilaero lämpöpumpun lauhduttimella vaihtelee 3,1 °C ja 8,1 °C välillä, keskiarvon ollessa 6,2 °C. Kohteen 6 lämpöpumppu on käynnistetty +24,1 °C lämpötilassa, jolloin se on toiminut kylmälaitteena ja jäähdyttänyt kiertonestettä. Tätä ei ole huomioitu laskennassa. Lämpöpumppujen toiminnassa ei havaittu poikkeavuuksia käyttöönotossa.

6.11.2 Ilma-vesilämpöpumppujen toiminta

Kohteet 5 ja 8 ovat laitevalmistajan omassa Swegon Inside Managerin etävalvonnassa. Järjestelmästä saadaan tarkasteltua lämpöpumpun toimintaa ja asetusarvoja. Lämpökerrointa Inside Managerista ei saada, mutta hetkellinen COP-arvo saadaan tarkastettua log p,h -tilapiirroksen ja toimintatietojen avulla. Laskentaan käytettiin CoolPack -ohjelmaa, versio 1.50. Tiedot on otettu ohjelmasta 10.11.2024, ulkolämpötila on +3,8 °C ja suhteellinen ilmankosteus 88 %. Asetus-

arvo lähtevälle nesteelle on +52,1 °C ja lämpöpumppu nostaa kiertonesteen lämpötilan +47,2 °C => +51,6 °C, lämpötilaero on 4,4 °C. Tehopyynti on 100 %. Lämpötila ei nouse asetusarvoon noin 3 tunnin seurantajakson aikana.

SB10169064 ZETA REV HP XT 9.2		
Signal	Value	UM
Alarm Code	No Alarms	
Alarm last	AL186 Defrost timeout circ. 1	
Power request	100	%
Unit Status	Heat Pump	
Setpoint active	52.2	°C
External air	3.3	°C
Water -Inlet common Temp.	47.2	°C
Water -Outlet common Temp.	51.6	°C
Circ.1 Cond. Press.	32.49	bar
Circ.1 Evap. Press.	5.52	bar
Circ.1 Suction Temp.	-1.2	°C
Circ.1 Disch. Temp.	95.5	°C
Circ.1 Superheat	4.6	°C
Circ.1 Cond. Press. Conv	53.9	°C
Circ.1 Evap. Press. Conv	-5.8	°C
Circ.1 Fan %	70	%
Circ.1 EEV %	56.8	%
Circ.1 Defrost status	No defrost	

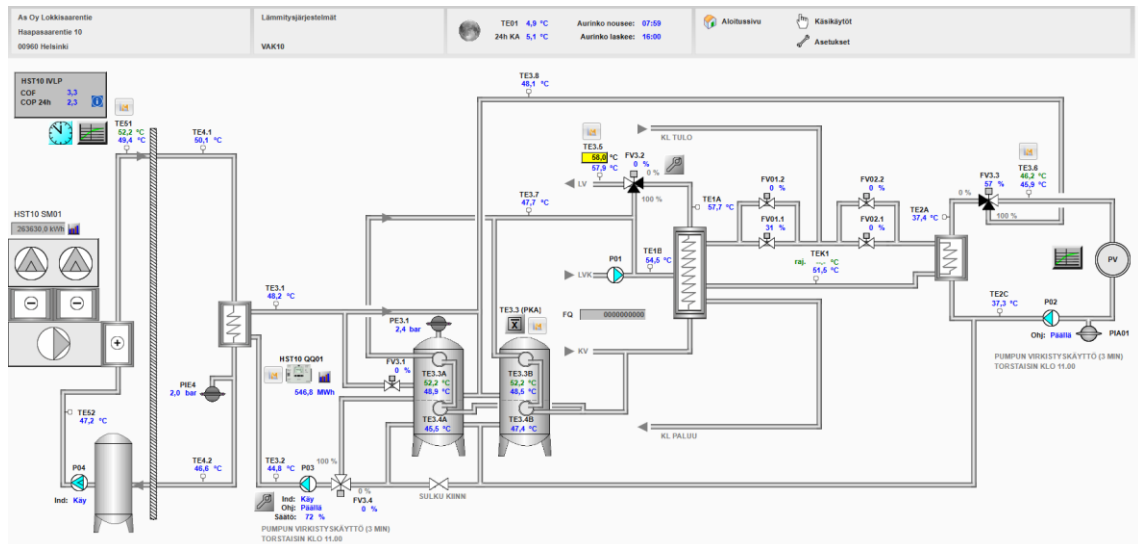
Kuva 32. Lämpöpumpun Zeta Rev HP XT 9.2 toimintatiedot ulkolämpötilassa +3,8 °C ja RH 88 % [52].

Etäkäyttöliittymän (kuva 23) mukaan lämpöpumpulla tuotetaan tarkastushetkellä lämpöä vain lämmitysverkostoon, jonka menoveden pyyntiarvon on +46,2 °C ja paluuvesi +37,1 °C. Lämmitysverkoston sekoitusventtiili FV3.3 on asennossa 55 %, joten ilma-vesilämpöpumpun ei teho riitä kattamaan koko lämmityksen tehontarvetta. Ulkolämpötila on +4,8 °C. Lämpöpumppuvalmistajan ulkolämpötilojen mittauspiste on Helsingin keskustassa, josta 1 °C:n ero mittaustuloksissa voi johtua. Laitteiston toiminnan arviointiin käytetään paikallista mittausta.

Ulkoyksiköltä lähtevä neste on IVLP-yksikön sisäisenmittauksen ja automaatiojärjestelmän välillä on noin 1 °C:n poikkeama. Lämpötila-anturien lukemat TE51 ja TE4.1 ovat käyttöjärjestelmässä epäloogisessa järjestyksessä, virtaus-suunnassa lämpötila kasvaa +49,4 °C => +51,1 °C. Seurannan aikana lämpötila-ero oli suurimmillaan 1,1 °C. IVLP-yksikön sisäisen anturin lämpötilan arvon +51,6 °C. Siirtonesteen lämpötila laskee matkalla lämpöpumpulta rakennuksen sisäiseen

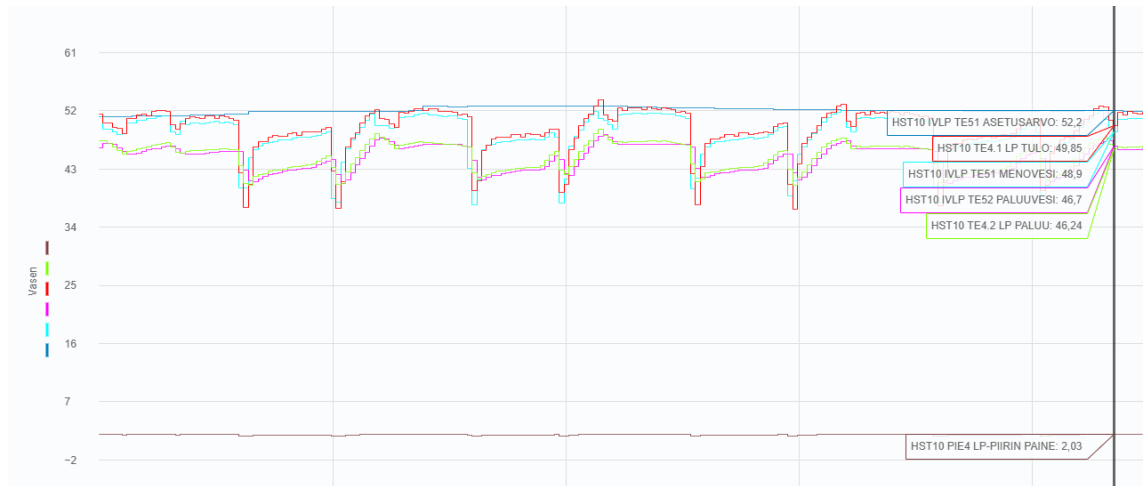
lämmitysverkostoon seurannan aikana noin 2–2,5 °C. Simuloinnissa käytetään arvoa 2,25 °C. Verkostojen välissä on levylämmönsiirrin.

Etäkäyttöliittymän ilmoittama hetkellinen COP oli 3,3. Seurannan aikana se kuitenkin pääsääntöisesti vaihteli 2,3–2,5 välillä. Viimeisen vuorokauden COP oli 2,3.



Kuva 33. Etäkäyttöliittymän tiedot 10.11.2024 [53].

Kuvan 34 mukaan sulatusjaksot toistuvat noin kahden tunnin sykleissä. Kaikkien sulatusjaksojen välissä asetusarvoa +52,2 °C ei saavuteta. Asetusarvo vaikuttaa olevan liian suuri verrattuna lämpöpumpun tuottamaan tehoon. Sulatusjaksot ovat noin 2 tunnin sykleissä,



Kuva 34. Kohteen 8 trendikäyrät 10.11.2024 lämpöpumpun toteutuneen menoveden asetusravon ja ajan suhteessa [48].

Kuvassa 35 ja liitteessä 4 on esitetty log p,h -tilapiirroksien avulla lämpöpumpun kiertoprosessi CoolPack -ohjelmalla. Ulkolämpötilassa on ollut +3,8 °C ja lämpöpumpulla on tuotettu +51,6 °C nestettä. Tarkemmat toiminta-arvot ovat esitetty kuvassa 32. Ideaalin kiertoprosessin jäähdytyksen COP on ohjelman mukaan 3,22 ja teoreettinen teho on 43,6 W (kJ/kg). Tässä saadaan teoreettinen massavirta kaavasta 7 $(43,6 / 140,2)$ kg/s = 0,31 kg/s. Lämmönsiirtimen teoreettinen teho on $(184 \times 0,31)$ kJ/kg = 57 W (kJ/kg). Ideaaliprosessin COP saadaan jakamalla teho lämmönsiirtimen entalpiamuutoksella $57 \text{ kJ/kg} / 184 \text{ kJ/kg} = 3,23$. Teho on yhtä suuri höyrystimellä. Ideaaliprosessi ei huomioi kompressorin aiheuttamaa hukkaa, eikä sulatusjaksoja.

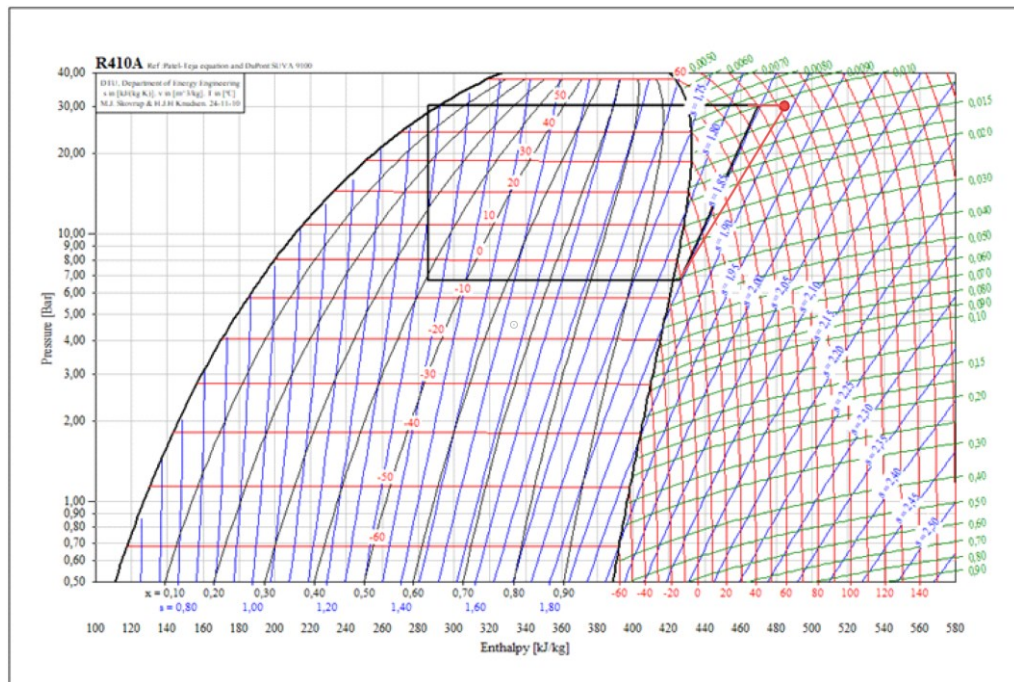
Tutkitussa kiertoprosessissa kylmäaineen tulistuslämpö on +95 °C, kun ideaaliprosessissa se on +80 °C. Tilapiirroksista saadaan tulistuksen entalpiain lisäys ideaaliprosessiin $470 \rightarrow 485$ kJ/kg. Teoreettinen lämmitysteho kasvaa $15 \text{ kJ/kg} \times 0,31 \text{ kg/s} = 4,7 \text{ W}$, eli suuremmaksi kuin jäähdytysteho. Kompressorin työmäärän W pysyessä vakiona, lämmityksen COP on aina parempi kuin jäähdytyksen. Lämpöpumpulta saadaan myös tehoa aina enemmän lämmitykseen. Tulistuminen on esitetty kuvassa 35. Tulistuminen heikentää hyötysuhdetta, mutta mahdollistaa korkeamman lämpötilan lauhduttimella.

$$q_m = \frac{\Phi}{\Delta h} \quad (7)$$

q_m = massavirta (kg/s)

Φ = teho W

Δh = entalpiamuutos (kJ/kg)



Kuva 35. Log p,h -tilapiirros muokattuna kylmäaineella R410A ulkolämpötilalla +3,8 °C. Tulistuksen vaikutus on lisätty kiertoprosessiin. [53.]

Log p,h -tilapiirroksen Cool Pack-ohjelman taulukkoarvot on esitetty ulkolämpötilassa +3,8 °C ja RH 88 %. Kohteessa 9 käynnistys on taulukon 15 mukaisesti tehty -3,5 °C lämpötilassa, joka lähellä -5 °C täystehomitoitusolettamaa [Liite 4].

Lämpöpumpun todellinen teoreettinen hyötysuhde lasketaan kaavojen (7) ja (8) avulla tarkastelu-ulkolämpötilalla +3,8 °C, jossa on huomioitu kylmäaineen tulistuminen.

$$\varphi = \frac{\Delta h_{LA}}{h_2 - h_1} \quad (8)$$

$$\varphi = 199 \text{ kJ/kg} / (485-422) \text{ kJ/kg} = 3,16$$

Hyötysuhde pienenee 3,22 => 3,16, eli noin 2 %. Tuotetun lämpötilan asetusarvo on +52,2 °C. Kuvan 26 mukaisesti lähellä oletettua mitoituslämpötilaa -3,5 °C ideaaliprosessissa COP on 2,6 (laitevalmistajan ilmoittama standardin mukainen COP on 2,2), kun lämpöpumpun asetusarvo on +60 °C. Havaintojen perusteella lämpöpumpun kylmäaineen kiertoprosessi toimii normaalisti.

6.11.3 Lämpökerroinvertailu

Kohteiden arvioidut, lasketut ja toteutuneet SCOP-arvot poikkeavat merkittävästi, vaihdellen taulukon 12 mukaisesti välillä 1,6–3,28. Hankesuunnittelussa arvioitu SCOP ylittää kylmäaineen R410A:n kiertoprosessin ideaaliarvon, jota ei voida saavuttaa järjestelmässä esiintyvien häviöiden vuoksi. Mitatut SCOP-arvot sisältävät putkistohäviöt sekä pumppujen ja oheislaitteiden sähkönkulutuksen, mutta sulatus huomioidaan niissäkin vain osittain.

Valmistajan standardin mukainen SCOP lämpöpumpun lauhduttimella valitulla asetusarvolla on 2,4. Käytettävissä olevilla tiedoilla todellista SCOP-arvoa ei saada laskettua. Järjestelmän toteutunut SCOP on 1,8. Erotuksen perusteella (1–1,8/2,4) todellinen lämpökerroin on noin 25 % valmistajan antamaa arvoa pienempi. Epätarkkuutta lämpökertoimen arvioitiin aiheuttaa sulatusenergian ottaminen kaukolämmöstä.

Taulukko 12. SCOP-arvojen yhteenvertailu, kun lämpöpumpun on oletusasetusarvo +60 °C.

Lämpökertoimen määrittelijä	SCOP	Selite
Hankesuunnittelu	3,28	Arvioidut arvot, perustuen oletettavasti IDA ICE simulointiin.
Ideaalinen toiminta (log p,h -tilapiirros)	3,16	Lämpöpumpun teoreettinen ideaalitalanne ilman häviöitä. COP on laskettu ulkolämpötilassa +4 °C. SCOP on arvioitu ulkolämpötilan pysyvyyssäyrän avulla.
Toteutunut	1,8	Käyttäjärjestelmästä lämmön ja sähkön kulutuksien mukaisesti, ajalla tammi-joulukuu 2023. Laskenta ei huomioi sulatusenergiaa, joka tulee kaukolämmöstä.
Käyttäjärjestelmä (DEOS)	1,6	Laskenta etähallintajärjestelmästä tuntipohjaisesti datasta sovitteen avulla. Sovite huomioi myös osittain sulatusjaksoja. SCOP-arvio on ulkolämpötilan pysyvyyssäyrän avulla.
Simulointi-Excel (lämmitys ja käyttövesi)	1,8	Käyttäjärjestelmästä on käytetty tuntipohjaista dataa (COP-arvot) läpi ja käsin poistettu epäjohtomukaisuudet. Sulatus jaksoja tuntipohjainen data ei ota huomioon. SCOP-arvio on laskettu lämpötilan pysyvyyssäyrän avulla.
Simulointi-Excel (lämmitys)	2,2	Tehdään vain lämmitys tarpeen mukaisesti. Ei suoraan vertailukelpoinen, kun tuottolämpötila lämmityssäyrän mukaisesti.
Valmistaja	2,4	Standardiolosuhteet, ilman järjestelmähäviöitä. SCOP on arvioitu simulointiohjelmalla valmistajan ilmoittamista COP-arvoista.
Ympäristöministeriön laskentaohje (L)	1,8	Lämpöpumppua käytetään lämmitykseen ja käyttöveteen.
Ympäristöministeriön laskentaohje (L ja KV)	2,2	Lämpöpumppua käytetään vain lämmitykseen. Ei suoraan vertailukelpoinen, kun tuottolämpötila lämmityssäyrän mukaisesti.

Todellisen käytön perusteella saavutettu SCOP-arvo on ollut 1,6–1,8, kun lämpöpulla tehdään käyttövettä ja lämmitystä. Myös ympäristöministeriön laskentaohjeen mukaiset arvot (1,8–2,2) tukevat käyttödataan perustuvia arviota.

6.11.4 Tutkittu IVLP-lämpökerroin

University College Dublinissa tehtiin tutkimus, jossa tarkasteltiin ilma-vesilämpöpumppujen käytönaikaisen suorituskyvyn ja nimellisuorituskyvyn välistä eroa. Siinä tutkittiin kattavasti lämpöpumppujen toimintaa käyttötilanteissa. Tutkimuksessa oli mukana 378 kohdetta. Keskimääräinen SCOP oli 2,59 kenttätutkimuksissa, johon sisältyi jonkin verran käyttöveden lämmitystä. Tilojen lämmityksen toteutunut SCOP oli 2,49. Standardin mukainen laitevalmistajien keskiarvo oli 4,12. Toteutunut SCOP standardia 40 % alhaisempi. Tutkimuksessa tunnistettiin 5 avaintekijää, jotka voivat vaikuttaa suorituskyvyn heikkenemiseen suhteessa standardin mukaiseen arvoon [24]:

- 1) lämpötila–ilmastovyöhyke
- 2) oletus yhdestä suhteellisesta kosteudesta
- 3) oletus käyttölämpötilasta, joka ei ehkä vastaa todellisuutta
- 4) lämpöhäviön huomioimatta jättäminen höyrytimen ja lauhduttimen yhdistävissä putkissa
- 5) lämpöpumpun kylmäaineen kiertoprosessin vaikutusten aliarviointi.

Tutkimuskohteiden lämpöpumput toimivat noin (1,8/3,36) 46 % esitteessä ilmoitettua standardin mukaista SCOP arvoa alhaisemmalla lämpökertoimella. Huomion arvoista on, että käytön ja standardin lämpökertoimen vertailua ei tule suoraan tehdä. Vertailussa täytyy ottaa huomioon todelliset käyttöolosuhteet.

6.11.5 Lämpöpumppujen tehomitoitus

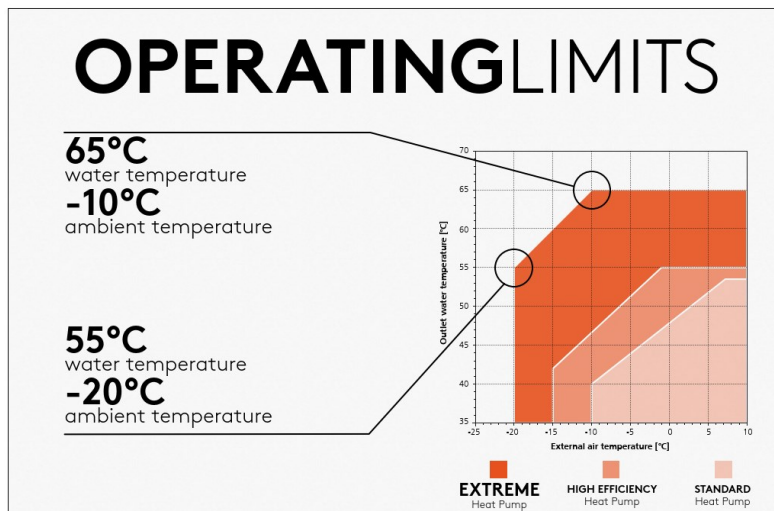
Ilmalämpöpumppujen tehomitoitus on tehty energiahankesuunnitelman mukaan monitavoiteoptimoinnin avulla ja ”Mitoituksen tavoitteena oli suhteuttaa mahdollisimman matala lämmityksen tehopeitto ja mahdollisimman korkea lämmityksen energiapeitto sekä lyhyin mahdollinen suora takaisinmaksuaika”. [45.]

Lähtötietona ovat olleet kiinteistönhallintajärjestelmän tuntikohtaiset tiedot käyttöveden ja lämmityksen kulutuksesta vuosilta 2016–2018, rakennusten lämmityspiirien tavoitelämpötila eri ulkolämpötiloissa ja ilma-vesilämpöpumppuvalmistajan ilmoittamat lämpöpumpun toiminta-arvot.

Hankesuunnitelmassa lämpöpumppujen toimintatavoitteet on määritetty ääriolosuhteiden perusteella. Niiden tulee toimia -20 °C ulkolämpötilaan asti tuottaen $+55\text{ °C}$ liuosta (COP 2,1–2,3) ja -15 °C ulkolämpötilaan asti tuottaen $+60\text{ °C}$ liuosta (COP 2,1–2,3).

Valmistajan toimittamissa lämpöpumppujen toiminta-arvoissa alimmaksi toimintalämpötilaksi on ilmoitettu -15 °C (hankesuunnitelma -20 °C) ulkolämpötila ja sitä vastaava $+55\text{ °C}$ liuoslämpötila. Lämpötilan pysyvyyskäyrän (TRY2012)

mukaan laskentavuoden mukaan -15 °C lämpötilan alittavia tunteja on 103 vuodessa, noin 1 % (103/8760) vuoden tunneista. Rakennuksen lämmitystarpeesta tämä on noin 3 % simuloinnin perusteella. Lämpöpumpun tuotto niin vähäistä toiminnan ääriämpötiloissa, että toimintalämpötilojen poikkeamalla on vain marginaalinen vaikutus koko vuoden tuotantoon.



Kuva 36. Swegon Zeta REV HP XT lämpöpumppusarjan toimintalämpötilat [45].

Swegonin esitteen kuva 36 esittää eri lämpöpumpputyypin käyttöalueet veden lämpötilan ja ulkolämpötilan mukaan. Äärimmäisiin olosuhteisiin tarkoitettujen lämpöpumppujen (Extreme) toiminta-alue on -25 °C ulkolämpötilassa ja tuottavat 65 °C menovettä, kun taas tehokkaammat standardilaitteet yltyvät enintään noin -10 °C ulkolämpötilaan ja $+55\text{--}60\text{ °C}$ veden lämpötilaan.

Kuvan 35 log p,h -tilapiirroksessa on esitetty toteutunut kiertoprosessi, jossa kylmäaine tulistuu $+95\text{ °C}$:seen. Tulistuslämmöllä kiertoneste voidaan lämmittää yli $+60\text{ °C}$:seen. Tulistuslämpöä on saatavilla tilapiirroksen mukaan noin 27 % ($54 / (184+15)$) kokonaistehosta. Esimerkiksi Zeta Rev HP XT 7.2 laitteessa, jonka laitevalmistajan ilmoittama teho on 80,1 kW, tulistusteho on noin 22 kW / $+95\text{ °C}$ ($80,1 \times 0,27$). Eli laitteistolla voidaan tuottaa osateholla $+65\text{ °C}$ kiertonestettä, mutta tutkimuksessa järjestelmässä tällä ominaisuudella ei ole juuri merkitystä lämpöpumpun tuottamaan suurimpaan lämpötilaan.

Energiatehokkuusselvityksen monitavoiteoptimoinnissa on haettu kohteelle paras ratkaisu tehopeiton, energiapeiton ja suoran takaisinmaksuajan perusteella. Laskennan tuloksena saadut tehot ja tehopeitot ovat esitetty taulukossa 9. Tehopeitot vaihtelevat 41–65 %:n välillä. Valitut ilma-vesilämpöpumput on esitetty liitteessä 8.

Kohteen 13 lämpöpumpun (ZETA HP XT 7.2 LN VEM) toimintaa tarkasteltiin tarkemmin simulointi-Excelin avulla. Hankesuunnittelun tehomitoitus on 80 kW (SCOP 3,3), joka vastaa täyttä tehomitoitusta -1 °C :n ulkolämpötilassa. Tehomitoitus on tapauskohtainen. Rakennusmääräysten laskentaohjeessa oletusarvo täydelle mitoitukselle on vastaavissa rakennuksissa -5 °C . Täyden tehon mitoituspistettä ei ole lähtötiedoissa määritetty. Laitteiston toimintalämpötiloiksi on hankesuunnitelmassa määritetty $+60\text{--}55\text{ °C}$ ja se on suunniteltu tekemään ensisijaisesti käyttövettä ja toissijaisesti lämmitystä.

Teknisen esitteen [Liite 5] mukaiset tehot ovat standardin EN14511 mukaisia. Standardin mukainen teho on mitattu $+7\text{ °C}$:n ulkolämpötilalla ja $+40\text{--}45\text{ °C}$:n lämmöntuotolla.

6.11.6 IVLP toiminnan simulointi

Standardin mukaiset ja taulukkoarvot

Excel-simulointiohjelmalla tarkasteltiin kohdetta 13 ja siihen asennetun Zeta Rev HP 7.2 XT lämpöpumpun toimintaa. Valmistajan (Liite 5) teknisen esitteen ja mitoituksen [41] mukainen teho on 80,1 kW standardin EN 14511 mukaisesti, kun menoveden lämpötila on $+45\text{ °C}$. Lämpöpumpun tuoton ollessa hankesuunnitelman mukainen $+60\text{ °C}$ tehomitoituspiste 80 kW saavutetaan taulukon 13 mukaan ulkolämpötilassa $+17\text{ °C}$.

Taulukko 13. Kohteen 13 toiminnan simulointi eri IVLP-vaihtoehtoilla. Lämpöpumpun asetusarvo on +60 °C, jolloin on mahdollista tehdä myös lämmintä käyttövedtä. Kohteeseen asennettu lämpöpumppu on Zeta HP XT 7.2, jonka nimellisteho on 80 kW.

Lämpöpumpun tyyppi	Lämpöpumpun asetusarvo	Lämpöpeitto (ei käyttövedtä)	Energiapeitto	SCOP	Tehomitoituspiste (Zeta HP 7.2, 80 kW)	Mitoitustehon ulkolämpötila (Zeta HP 7.2, 80kW)
(käyttöveden teko mahdollista)	°C	%	%		°C	
ZETA HP XT 5.2 LN VEM, 1PS	+60 °C	57 %	31 %	1,85	8	Ei saavuta
ZETA HP XT 7.2 LN VEM, 1PS	+60 °C	69 %	37 %	1,83	5	17
ZETA HP XT 9.2 LN VEM, 1PS	+60 °C	80 %	43 %	1,88	2	7
ZETA HP XT 10.4 LN VEM, 1PS	+60 °C	85 %	46 %	1,84	0	1
ZETA HP XT 12.4 LN VEM, 1PS	+60 °C	89 %	48 %	1,85	-3	-5

Kohteen lämpöpumpulla Zeta Rev HP XT 7.2 saavutetaan simuloinnin perusteella 37 % energiapeitto, kun liitteen 3 mukaan toteutunut energiapeitto on 40 %. Lämpöpumppu käy koko ajan täydellä teholla ja sillä tuotetaan lämpöä rakennuksen verkostoon maksilämpötilalla +60 °C. Energiapeiton laskennassa on käyttöveden osuudeksi oletettu 40 % ja sulatushäviöksi 10 %. Järjestelmän toteutunut SCOP-arvo on valmistajan ilmoittamaa [Taulukko 12] arvoa noin 24 % pienempi.

Taulukko 14. Kohteen 13 toiminnan simulointi eri IVLP-vaihtoehtoilla. Lämpöpumpun asetusarvo muuttuu patteriverkoston pyynnön ja lämpöpumpun tehon suhteessa.

Lämpöpumpun tyyppi	Lämpöpumpun asetusarvo	Lämpöpeitto (ei käyttövedtä)	Energiapeitto	SCOP	Tehomitoituspiste (Zeta HP 7.2, 80 kW)	Mitoitustehon ulkolämpötila (Zeta HP 7.2, 80kW)
(Ei tehdä käyttövedtä)	°C	%	%		°C	
ZETA HP XT 5.2 LN VEM, 1PS	+30–53 °C	64 %	35 %	2,35	6	11
ZETA HP XT 7.2 LN VEM, 1PS	+30–54 °C	76 %	41 %	2,24	3	6,5
ZETA HP XT 9.2 LN VEM, 1PS	+30–55 °C	84 %	45 %	2,27	0	1
ZETA HP XT 10.4 LN VEM, 1PS	+30–57 °C	86 %	46 %	2,16	-1	-1
ZETA HP XT 12.4 LN VEM, 1PS	+30–59 °C	90 %	49 %	2,10	-3	-6

Lämpöpumppu on mitoitettu tuottamaan mahdollisimman suuren osan lämmitysenergiasta mahdollisimman alhaisella menolämpötilalla, jotta järjestelmän hyötysuhde pysyy korkeana. Kun tehomitoituspiste on asetettu $+3\text{ °C}$:seen, lämpöpumpun teho ei riitä enää käyttöveden tuottamiseen, vaan koko kapasiteetti ohjautuu rakennuksen lämmitykseen.

6.11.7 Lämpöpumpun valinta

Ilma-vesilämpöpumppu valitaan aina tapauskohtaisesti. Kaukolämmön ollessa päälämmitysmuotona ja hinnoittelun ollessa kuukausikohtaista, kesäaikana touko–syyskuussa lämpöpumpun käyttö ei ole Helsingissä kannattavaa kaukolämmön edullisen hinnan vuoksi [kuva 21]. Lämpöpumpun valinnassa tämä tulee huomioida siten, että sen käyttö aste on mahdollisimman suuri kalliin kaukolämpöenergian aikaan.

Ilma-vesilämpöpumpulle valitaan tehomitoituspiste mahdollisimman alhaisesta ulkolämpötilasta. Se määräytyy lämpöpumpun korkeimman tuottolämpötilan ja sitä vastaavan lämmitysverkoston menoveden lämpötilan mukaisesti, huomioiden siirtohäviöt. Simulointitaulukosta saadaan tehomitoitus piste välillä $-4\dots-6\text{ °C}$. Valitaan tehomitoituslämpötilaksi -5 °C , joka ympäristöministeriön laskentaohjeen oletusarvon mukainen [49]. Täyden tehomitoituksen tunteja on vuodessa (7790/8660) 89 % ja lämpötilassa -10 °C teoreettinen enimmäistuotto on 80 %, kun lämpöpumpun maksituotto on $+60\text{ °C}$. Rakennuksen lämpöhäviö on 95 kW tehomitoituslämpötilassa.

Taulukon 13 perusteella laitteistoksi valitaan Zeta Rev HP 12.4 XT tarkempaa tarkastelua varten:

- Tehomitoituspiste on -3 °C , kattaa (7640/8760) 87 % vuoden tunneista
- Lämmitysteho lämpötilassa -3 °C on 89 kW
- Lämmitysteho lämpötilassa -10 °C on 70 kW
- Energiapeito on noin 49 % tarvitusta energiasta, kun lämpöpumpulle ei tehdä käyttövetä

- Lämmitysenergiapaitto on noin 90 %
- SCOP on 1,85–2,10, riippuen tehdäänkö lämpöpumpulla käyttövedettä

Lämpöpumppu Zeta Rev HP 12.4 XT -laitteisto vaikuttaa tehon puolesta riittävältä kohteeseen. Valittu malli on kuitenkin Zeta Rev HP 14.4 XT, jolloin tehomi-toituspiste on noin -5 °C ja käyttöveden tekeminen on tehokkaampaa kauko-lämpöhinnan ollessa kalleimmillaan. Lämpöpumpulle tulisi myös vähemmän kuormitusta ja todennäköisesti elinkaari on pidempi. Pumpun lopullisen valinnan yhteydessä on suositeltava tehdä tarkemmat elinkaari- ja kannattavuuslaskel-mat.

7 Johtopäätökset

Tutkimus osoittaa, että lämpöpumppujen hyödyntäminen rakennusten lämmityk-sessä on tehokas keino parantaa energiatehokkuutta ja vähentää päästöjä. Jär-jestelmien suunnittelu ja käyttöönotto edellyttävät kuitenkin huolellista tapaus-kohtaista arviointia. Lämmitysjärjestelmien käyttöolosuhteet vaihtelevat raken-nuskohtaisesti, ja ne on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Lämpö-pumpun tuottaman energian lämpötila tulisi optimoida mahdollisimman mata-laksi, jotta saavutetaan mahdollisimman korkea lämpökerroin. Energiapaiton riit-tävyys on varmistettava erikseen mitoituksella ja järjestelmävalinnoilla. Käyttö-veden tuottaminen lämpöpumpulla on harvoin kannattavaa, ja sen toteutus tu-lee aina arvioida erikseen.

Ilma-vesilämpöpumppujen (IVLP) kohdalla laitteistojen valmistajien ilmoittamat teho- ja hyötysuhdeluvut eivät sellaisenaan vastaa todellisia käyttöolosuhteita. Mitoituksessa on huomioitava koko järjestelmän toimintalämpötilat, lämpöhäviöt ja ulkoiset tekijät, kuten ulkolämpötilan vaihtelut ja sulatussykliin vaikutukset. IVLP-järjestelmien mitoitusperusteina kannattaa käyttää täyden tehomi-toituspis-tettä ja energiapaittoa. Lopullinen pumpun valinta tehdään kannattavuuslaskel-mien perusteella.

Alalla ei ole yleisesti hyväksytyjä kytkentäkaavioita, mikä johtaa suunnittelija-kohtaisiin ratkaisuihin lämpöpumppujärjestelmien suunnittelussa ja toteutuksessa. Tämä lisää käyttöönoton haasteita ja voi vaikuttaa järjestelmien suorituskykyyn. Suunnittelukäytäntöjen yhtenäistäminen ja järjestelmien kokonaisvaltainen huomioiminen jo suunnitteluvaiheessa parantaisivat järjestelmien toimivuutta ja energiataloudellisuutta.

Lämpöpumppujen käyttötilanteissa on havaittu ongelmia järjestelmien hallinnassa ja säädöissä, mikä on heikentänyt saavutettuja energiansäästöjä ja vähentänyt investointien kannattavuutta. Lämpöpumppuratkaisujen tehokkuus ei riipu pelkästään yksittäisten laitteiden suorituskyvystä, vaan koko järjestelmän yhteensovittamisesta ja käytönaikaisesta seurannasta.

Pääkaupunkiseudulla kaukolämmön hinnan ennakoidaan seuraavan melko tarkasti sähkön hintaa. Tehojoustolla ja lämmönvarastoinnilla voidaan tasata kulu-tushuippuja, mikä osaltaan vakauttaa sähkön ja kaukolämmön markkinahintoja.

Lämpöpumppujärjestelmien parhaan suorituskyvyn varmistamiseksi suositellaan laitteistojen mitoituksen yhdenmukaistamista, säätöjen kokonaisvaltaisempaa testaamista käyttöönoton yhteydessä sekä etäseurannan ja analytiikan kehittämistä. Näiden toimenpiteiden avulla voidaan parantaa järjestelmien energiataloudellisuutta ja varmistaa, että lämpöpumppuinvestoinneilla saavutetaan asetetut tavoitteet. Jatkossa tulisi yhdistää teoreettinen tieto, käytännön toteutus ja todellinen suorituskyky jo suunnitteluvaiheessa, jotta lämpöpumppujärjestelmien kannattavuus ja luotettavuus paranisivat.

8 Yhteenveto

Rakennusten energiakäytöllä on tärkeä rooli vihreässä siirtymässä, sillä rakennukset kuluttavat EU:ssa 40 % energiasta ja tuottavat 36 % hiilidioksidipäästöistä. Energiatehokkuutta parantavat ratkaisut, kuten lämpöpumpputeknologia, ovat avainasemassa siirryttäessä kohti hiilineutraaliutta.

Suomessa regulaatio ohjaa vihreää energiasiirtymää. Kansallinen ilmastolaki määrittää päästövähennystavoitteet ja sen mukaan Suomen on oltava hiilineutraali viimeistään vuonna 2035 [5]. Pääkaupunkiseudun kaupungit Helsinki, Vantaa ja Espoo ovat asettaneet tavoitteeksi hiilineutraaliuden vuoteen 2030 mennessä. Fortum, Helen ja Vantaan Energia ovat siirtymässä pois fossiilisista polttoaineista ja korvaamassa kaukolämpötuotantoaan uusiutuvilla energialähteillä sekä lämpöpumppuratkaisuilla. Esimerkiksi Helenin suunnitelmana on, että lämpöpumput kattaisivat 57 % kaukolämmön tuotannosta vuoteen 2030 mennessä.

Suomessa oli vuonna 2024 Euroopan kolmanneksi edullisin sähkö (46 €/MWh), kun keskimääräinen hinta Euroopassa oli 81 €/MWh. Fingridin visioiden mukaan sähkön kulutuksen odotetaan kaksinkertaistuvan vuoteen 2035 mennessä. Sähkön hintaennusteiden perusteella sähkönhinnan odotetaan pysyvän 70–90 €/MWh:n tasolla vuonna 2035. Helenin tavoitteena on tuottaa 90 % kaukolämpöenergiasta lämpöpumppujen, sähkön ja biopolttoaineiden avulla vuoteen 2030 mennessä.

Tutkimuksessa tarkasteltiin kahdeksaa poistoilmalämpöpumpulla (PILP) varustettua asuinkerrostalokohdetta. Kohteiden seuranta-aika oli vuoden mittainen ja niiden energiankulutustiedot kerättiin etähallintajärjestelmien avulla kuukausitasolla. Tulokset osoittivat, että lämpökertoimet vaihtelivat kohteittain välillä 3,37–3,65 ja keskimääräinen SCOP-arvo oli 3,56. PILP-järjestelmien energiansäästöpotentiaali riippuu merkittävästi rakennuksen poistoilmavirran määrästä ja sisäilman suhteellisesta kosteudesta. Työssä tehdyn Excel-laskentamallin avulla voidaan arvioida poistoilmasta saatava lämmitysteho ja energiapeitto kannattavuuden arviointia varten. Laskuri ottaa huomioon poistoilmasta saavan latenttienergian ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan mukaisesti. Sitä voidaan käyttää myös muiden ilmasta energiaa ottavien prosessien tarkasteluun.

Toisen kenttätutkimuksen kohteena oli 14 asuinrakennuksen ilma-vesilämpöpumppujärjestelmät (IVLP), joiden tavoitteena on lämmittää rakennusten lämmitysverkosto sekä käyttövesi mahdollisimman energiatehokkaasti. Järjestelmät on toteutettu hybridimallina kaukolämmön rinnalle, ja niissä on käytössä

Swegon Zeta Rev HP XT -ilma-vesilämpöpumput, joiden mitoitus perustuu rakennusten toteutuneisiin lämmitys- ja vedenkulutustietoihin. Tutkimuksessa havaittiin merkittäviä eroja lämpöpumppujen suunnitellun ja toteutuneen suorituskyvyn välillä. Todelliset COP-arvot olivat keskimäärin noin 34 % alhaisempia kuin valmistajan ilmoittamat EN 14511 -standardin mukaiset vertailuarvot. Vuosihyötysuhde (SCOP) jäi noin 24 % arvioitua valmistajan arvoa pienemmäksi. Ero lämpökertoimissa selittyy pääasiassa ulkolämpötilan astetuntijakauman painotuksella todellisissa käyttöolosuhteissa. Kohteiden energiaperitto jäi oletettua pienemmäksi, koska lämpöpumpun teho ei riittänyt kattamaan lämmityskauden tarpeita, ja käyttöveden tuotanto osoittautui kannattamattomaksi. Lisäksi lämpöpumpun tuottaman menoveden lämpötila jäi suunniteltua alhaisemmaksi, mikä rajoitti järjestelmän toimintaa tilanteissa, joissa tarvittiin korkeampaa lämpötilatasoa. Täystehomitoituspiste oli määritetty liian alhaiseksi, koska lämpöpumpun koko ei vastannut rakennuksen todellista lämmitys- ja käyttövesitarvetta.

Lähteet

- 1 Lämpöpumput aiheuttivat pettymyksen monissa taloyhtiöissä. Yle. 2024. Verkkoaineisto. <<https://yle.fi/a/74-20086002>>. Luettu 17.5.2024.
- 2 Mitä hiilineutraalius tarkoittaa ja miten se saavutetaan 2050 mennessä? Euroopan parlamentti. Verkkoaineisto. <<https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20190926STO62270/mita-hiilineutraalius-tarkoittaa-ja-miten-se-saavutetaan-2050-mennessa>>. Luettu 16.5.2024.
- 3 EU:n kasvihuonekaasupäästöjen leikkaaminen: vuoden 2030 kansalliset tavoitteet. Euroopan parlamentti. Verkkoaineisto. <<https://www.europarl.europa.eu/topics/fi/article/20180208STO97442/eu-n-kasvihuonekaasupaastojen-leikkaaminen-vuoden-2030-kansalliset-tavoitteet>>. Luettu 16.5.2024.
- 4 Vuosi 2024 oli lämpimin mittaushistoriassa. Copernicus Climate Change Service; ECMWF. Verkkoaineisto. <<https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/news/2025/2024-was-warmest-year-record-copernicus-data-show>>. Luettu 21.4.2025
- 5 Ilmastolaki. 2022. 423/14.6.2022
- 6 Hiilineutraali Helsinki – päästövähennysohjelma. Helsingin kaupunki. 2024. Päivitys 2024. Helsinki: Helsingin kaupunki
- 7 Espoon ilmastotavoite. Espoon kaupunki. Verkkoaineisto. <<https://ilmasto.vahti.espoo.fi/hiilineutraali-espoo/espoo-ilmastotavoite>>. Luettu 20.1.2025.
- 8 Vantaan resurssiviisauden tiekartta. Vantaan kaupunki. 2022. Vantaa: Vantaan kaupunki.
- 9 Päästövähennysohjelman seuranta – päästölaskuri. Helsingin kaupunki. Verkkoaineisto. <<https://ilmasto.hel.fi/hillinta/hiilineutraali-helsinki-paastovahennysohjelma/paastovahennysohjelman-seuranta>>. Tulostettu 22.2.2025
- 10 Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta. 2024. Direktiivi 2024/1275
- 11 Energian kokonaiskulutus. Tilastokeskus. 2025. Verkkoaineisto. <https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin__ehk_pxt_12vk.px/table/tableViewLayout1/>. Luettu 21.4.2025

- 12 Maakäytön suunnittelu ja maalämpö. 2020. Helsinki: Helsingin kaupunki.
- 13 Omistajaohjaus – valtionyhtiöt. Valtioneuvosto. Verkkoaineisto. <<https://valtioneuvosto.fi/omistajaohjaus/yhtiöt>>. Luettu 21.4.2025.
- 14 Vuosikertomus. Vantaan Energia. 2023. Vantaa: Vantaan Energia.
- 15 Auvinen, Karoliina. 2020. Muutostavoite: Hiilineutraali kaukolämpö vuoteen 2035 mennessä – muistio. Helsinki: Suomen ympäristökeskus (Syke).
- 16 KL-päästölaskuri. Paikallisvoima ry. Verkkoaineisto. <<https://www.klpaastolaskuri.fi/>>. Luettu 21.4.2025.
- 17 Energy Technology Perspectives 2023. International Energy Agency (IEA). 2023. Paris: IEA.
- 18 Lämpöpumput. Suomen lämpöpumppuyhdistys ry (SULPU). Verkkoaineisto. <<https://www.sulpu.fi/lampopumput/>>. Luettu 2024.
- 19 Rakennukset ja kesämökit. Tilastokeskus. 2023. Taulukko 116 h – rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan. Verkkoaineisto. <<https://pxdata.stat.fi/>>. Luettu 2025.
- 20 Poistoilmalämpöpumput. Kiinteistöjärjestelmät. 2021. RT 103316. Rakennustieto
- 21 Rämä, Miika; Niemi, Rami & Similä, Lassi. 2015. Poistoilmalämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. VTT-CR-00564-15. Espoo: VTT.
- 22 Pyly, Petri; Kurnitski, Jarek. 2021. Measured performance of exhaust air heat pumps in Finnish apartment buildings. Verkkoaineisto. <https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/61831582/e3sconf_hvac2021_06001.pdf>. Luettu 2024.
- 23 Thalfeldt, Martin; Kurnitski, Jarek; Latõšov, Eduard. 2018. Exhaust air heat pump connection schemes and balanced heat recovery ventilation effect on district heat energy use and return temperature. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431117308281>>. Luettu 2024.
- 24 O’Hegarty, Richard; Kinnane, Oliver; Lennon, Donal; Colclough, Shane. 2022. Air-to-water heat pumps: Review and analysis of the performance gap between in-use and product rated performance. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 155, 111887. Verkkoaineisto.

- <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121011540>>. Luettu 2024.
- 25 Weigert, Andreas; Hopf, Konstantin; Günther, Sebastian A; Staake, Thorsten. 2022. Heat pump inspections result in large energy savings when a pre-selection of households is performed: A promising use case of smart meter data. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522003810>>. Luettu 2024.
- 26 Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. 2021. K1/2021. Energiateollisuus.
- 27 Energiamuotojen päästökertoimet. Syke. Verkkoaineisto. <<https://co2data.fi/rakentaminen/>>. Luettu 10.1.2025.
- 28 Miten sähkön hinta muodostuu? Fingrid. Verkkoaineisto. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu>>. Luettu 21.1.2024.
- 29 Energiavuosi 2024: Sähkö. Energiateollisuus ry. 2025. Helsinki: Energiateollisuus ry.
- 30 Fingrid's electricity system vision 2022. Fingrid. 2022. Verkkoaineisto. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/en/news/fingrid_electricity_system_draft_scenarios.pdf>. Luettu 21.4.2025.
- 31 Kaappola, Esko; Hirvelä, Risto; Jokela, Hannu; Kianta, Martti. 2018. Kylmätekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- 32 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö. 1978. Rakentamismääräyskokoelma D2. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 33 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö. 1987. Rakentamismääräyskokoelma D2. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 34 Virta, Hannu; Pylsy, Petri. 2011. Taloyhtiön energiakirja. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy. Julkaistu yhteistyössä Sitran kanssa.
- 35 Asuinrakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän peruskorjaus ja -parannus. 2004. RT 56-10831. Rakennustieto.
- 36 Tuomarmäki, Tero. 2015. Kaksivaiheisen lämmöntalteenotto-prosessin soveltuvuus poistoilmanvaihtoiseen kerrostaloon. LUT, diplomi-insinöörin opinnäytetyö.

- 37 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Ympäristöministeriö. 2003. Rakentamismääräyskokoelma D2. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 38 Kaukolämmön hinnat. Helen Oy. Verkkoaineisto. <<https://www.helen.fi/kaukolampo/hinnat>>. Luettu 24.1.2025.
- 39 Legionellabakteerit vesijärjestelmissä. Terveystieteiden tutkimuskeskus (THL). Verkkoaineisto. <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/vesi/legionella-bakteerit-vesijarjestelmissa>. Luettu 1.5.2024.
- 40 Ohje hybridikytkennästä asiakkaan kaukolämpölaitteiston rinnalle. 22.1.2024. Helsinki: Helen Oy.
- 41 Humidity Calculator. Vaisala. Sovellus.
- 42 Kuvakaappaus. 2024. Ouman Ounet -etähallintajärjestelmä.
- 43 Ilma-vesilämpöpumput, pientalot. 2023. RT 103598. Rakennustieto.
- 44 Energiahankesuunnitelma: Asunto-osakeyhtiö x. x Oy. 2020. Asiakirjanumero Y00003. Helsinki: x
- 45 Energiategohokkuusselvitys: Asunto-osakeyhtiö x. 15.5.2020. x Oy. 2020. Helsinki: x.
- 46 ZETA Rev HP XT – tuote-esite. Swegon.
- 47 Wisak, Miika. Helen Oy. Teams-tapaaminen. 17.9.2024.
- 48 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmöntarpeen laskentaohje. 2018. Rakennusmääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 49 Kuvakaappaus. 2024. Rakennusautomaation DEOS-järjestelmä.
- 50 ZETA Rev HP XT – tekninen-esite. 2019. Swegon.
- 51 Taiminen, Maria. Swegon. Sähköpostit. 2024.
- 52 Rakennusautomaation lokitieto. Etähallintajärjestelmänä Deos. Aikavälillä 1.10.2023–29.5.2024.
- 53 Log p,h-tilapiirros. CoolPack 1.50. Kuvakaappaus.
- 54 Kuvakaappaus. 2024. Swegon, Inside Manager -järjestelmä.

LIITE 1: PILP-järjestelmän tehontuoton laskentakaavat

$$\rho_i = \frac{p_i \cdot M_i}{R \cdot T} \quad \blacktriangleright \quad (1)$$

$$\rho_h = \frac{p_h \cdot M_h}{R \cdot T} \quad \blacktriangleright \quad (2)$$

$$\rho = \rho_i + \rho_h \quad \blacktriangleright \quad (3)$$

$$p = p_i + p_h \quad \blacktriangleright \quad (4)$$

$$x = \frac{m_h}{m_i} = \frac{\rho_h}{\rho_i} \quad \blacktriangleright \quad (5)$$

$$\Rightarrow x = \frac{M_h \cdot p_h}{M_i \cdot p_i} = 0,6220 \cdot \frac{p_h}{p_i} = 0,6220 \cdot \frac{p_h}{p - p_h}$$

$$p_h = \frac{x}{0,6220 + x} \cdot p \quad \blacktriangleright \quad (6)$$

$$h_k = h_i + x \cdot h_h = c_{pi} \cdot t + x \cdot (l_{h0} + c_{ph} \cdot t) \quad \blacktriangleright \quad (7)$$

$$h_k = 1,006 \cdot t + x \cdot (2501 + 1,85 \cdot t)$$

Kun ilman lämpötila on yhtä suuri tai suurempi kuin 0 °C:

$$\log p_h(t) = 28,59051 - 8,2 \cdot \log(t + 273,16) + 0,0024804 \cdot (t + 273,16) - \frac{3142,31}{(t + 273,16)} \quad \blacktriangleright \quad (8)$$

Kun ilman lämpötila on alle 0 °C:

$$\log p_h(t) = 10,5380997 - \frac{2663,91}{(t + 273,16)} \quad \blacktriangleright \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{p_h}{p'_h} \quad \blacktriangleright \quad (10)$$

$$\frac{x'(t_M) - x}{t - t_M} = \frac{c_p}{l(t_M)} \cdot \frac{1}{Le^{1-n}} \quad \blacktriangleright \quad (11)$$

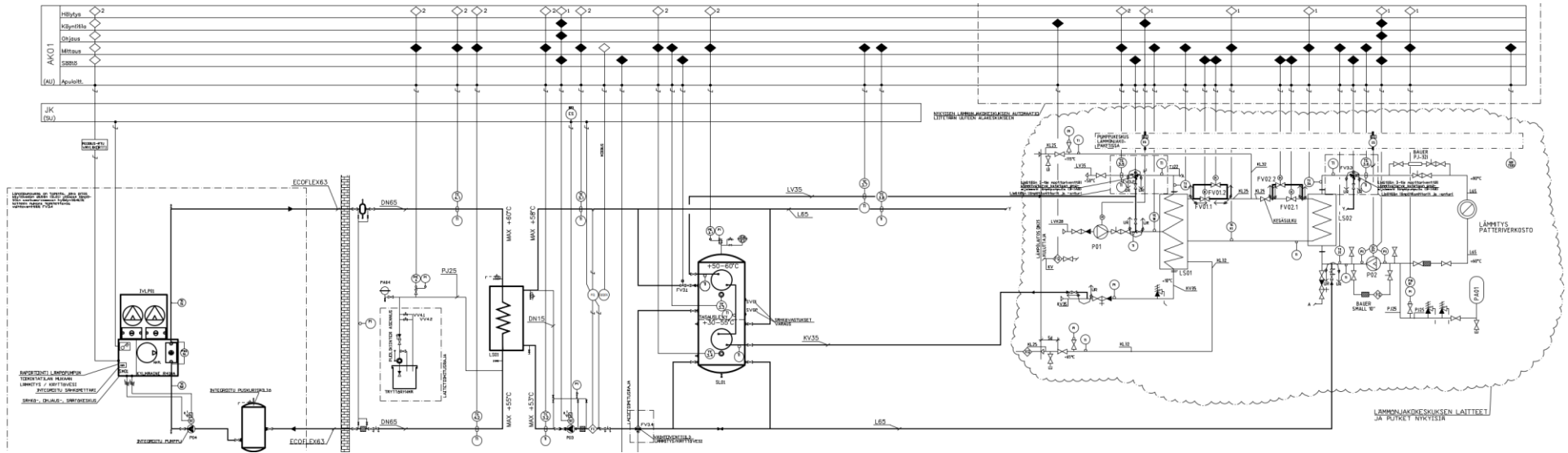
$$t = \frac{h_k - x \cdot 2501}{1,006 + x \cdot 1,85} \quad \blacktriangleright \quad (12)$$

$$\phi_L = q_v \cdot \rho_{i,u} \cdot (h_2 - h_1) = q_m \cdot (h_2 - h_1) \quad \blacktriangleright \quad (13)$$

Suureiden selitteet:

t	$^{\circ}\text{C}$	(ilman lämpötila Celsiusasteina)
T	K	(ilman lämpötila Kelvinasteina)
ψ		(suhteellinen kosteus)
p	Pa	(ilman kokonaispaine)
R	J/mol K	(kaasuvakio)
M_i	kg/mol	(ilman molekyyli massa)
M_h	kg/mol	(vesihöyryn molekyyli massa)
p_h'	Pa	(kylläisen vesihöyryn osapaine)
p_h	Pa	(vesihöyryn osapaine)
x_1	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_k$	(ilman kosteus)
x_1	$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{m}^3$	(ilman kosteus)
ρ_i	kg/m^3	(kuivan ilman osatiheys)
ρ_h	kg/m^3	(vesihöyryn osatiheys)
ρ	kg/m^3	(kostean ilman tiheys)
h_k	kJ/kg	(kostean ilman entalpia)

LIITE 2: IVLP-järjestelmän kytkentäkaavio



LIITE 3: COP ja lämpöpeitto tammi-joulukuussa 2023 [50].

Rakennus	Lämpökulutus MWh	KL-kulutus [MWh]	VILP-lämpö [MWh]	VILP-sähkö [MWh]	COP toteutunut	COP Laskettu	COP toteuma lasketusta	Lämpöpeitto toteutunut	Lämpöpeitto Laskettu	Lämpöpeitto Erotus
Kohde 1	218,3	108,3	109,9	73,6	1,49	3,24	46 %	50 %	92 %	42 %
Kohde 2	273,7	175,7	98	50,8	1,93	3,31	58 %	36 %	92 %	56 %
Kohde 3	634,5	323,2	311,3	163,2	1,91	3,21	59 %	49 %	94 %	45 %
Kohde 4	261,4	151,3	110,2	64,1	1,72	3,29	52 %	42 %	92 %	50 %
Kohde 5	457,3	287,1	170,1	87,9	1,94	3,27	59 %	37 %	92 %	55 %
Kohde 6	723,4	457,9	265,5	135,5	1,96	3,28	60 %	37 %	89 %	52 %
Kohde 7	259,6	169,1	90,4	51,8	1,75	3,28	53 %	35 %	90 %	55 %
Kohde 8	264,8	179,7	85,1	45,1	1,89	3,34	56 %	32 %	85 %	53 %
Kohde 9	229,4	141,7	87,7	46,7	1,88	3,29	57 %	38 %	93 %	55 %
Kohde 10	249,5	118,8	130,7	68,3	1,91	3,21	60 %	52 %	91 %	39 %
Kohde 11	520,8	317,8	203,1	111,2	1,83	3,27	56 %	39 %	91 %	52 %
Kohde 12	262,3	220,3	42,1	30,7	1,37	3,3	42 %	16 %	91 %	75 %
Kohde 13	283	168,5	114,4	66,9	1,71	3,3	52 %	40 %	91 %	51 %
Kohde 14	716,1	481	235,1	118,9	1,98	3,34	59 %	33 %	85 %	52 %

LIITE 4: Kylmäaineen R410A ideaalikiertoprosessi, CoolPack

Cycle info [One stage], Refrigerant: R410A

Select cycle number:

Delete cycle

Values:

Evaporating temperature [°C]:	-5,50	Condensing temperature [°C]:	49,70
Superheat [K]:	4,60	Subcooling [K]:	2,33
Dp evaporator [bar]:	0,00	Dp condenser [bar]:	0,00
Dp suction line [bar]:	0,00	Dp liquid line [bar]:	0,00
Dp discharge line [bar]:	0,00		
Isentropic efficiency [0-1]:	1,00		

Calculated:

Qe [kJ/kg]:	140,176
Qc [kJ/kg]:	183,765
COP:	3,22
W [kJ/kg]:	43,589
Pressure ratio [-]:	4,501

Dimensioning:

Qe [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
Qc [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
m [kg/s]:	<input type="text" value="0,00000000"/>
V [m ³ /h]:	<input type="text" value="0,0000"/>
W [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
Q loss [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>

Volumetric efficiency

n_vol:

Displacement [m³/h]: 0

OK Coordinates of points... Print Copy Update Help

Ideaalikiertoprosessin hyötysuhde Ulkolämpötila +3,8 C ja RH 88 %. [53]

Cycle info [One stage], Refrigerant: R410A

Select cycle number:

Delete cycle

Values:

Evaporating temperature [°C]:	-4,70	Condensing temperature [°C]:	58,60
Superheat [K]:	7,60	Subcooling [K]:	5,00
Dp evaporator [bar]:	0,00	Dp condenser [bar]:	0,00
Dp suction line [bar]:	0,00	Dp liquid line [bar]:	0,00
Dp discharge line [bar]:	0,00		
Isentropic efficiency [0-1]:	1,00		

Calculated:

Qe [kJ/kg]:	128,042
Qc [kJ/kg]:	177,645
COP:	2,58
W [kJ/kg]:	49,603
Pressure ratio [-]:	5,352

Dimensioning:

Qe [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
Qc [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
m [kg/s]:	<input type="text" value="0,00000000"/>
V [m ³ /h]:	<input type="text" value="0,0000"/>
W [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>
Q loss [kW]:	<input type="text" value="0,000"/>

Volumetric efficiency

n_vol:

Displacement [m³/h]: 0

OK Coordinates of points... Print Copy Update Help

Kohteessa 9 lämpöpumpun käynnistys on tehty -3,5 °C ulkolämpötilassa [Liite 5].

Olosuhde on lähellä -5 °C:n täystehomitoitusolettamaa [49; liite 2].

LIITE 5: Swegon ZETA REV HP XT tuote-esiteen tekniset tiedot

Ote Swegon teknisestä esiteestä Zeta Rev HP XT, 4.12.2019 [46].

			3.2	4.2	5.2	6.2	7.2	8.2
Cooling								
Refrigeration capacity	(1)	kW	37,6	46,6	52,7	61,7	72,0	80,5
EER	(1)		2,99	2,96	2,93	3,02	2,97	2,96
Eurovent efficiency class	(1)		B	B	B	B	B	B
ESEER*			3,79	3,68	3,90	3,89	3,89	3,94
SEER 12/7			3,49	3,42	3,64	3,69	3,58	3,73
Heating								
Heating capacity	(2)	kW	42,2	52,3	57,7	71,0	80,1	85,7
COP	(2)		3,50	3,49	3,50	3,49	3,49	3,49
Eurovent efficiency class	(2)		A	A	A	A	A	A

			9.2	10.4	12.4	14.4	16.4	18.4
Cooling								
Refrigeration capacity	(1)	kW	91,2	107,3	126,3	145,4	161,4	183,7
EER	(1)		2,94	2,93	2,99	2,92	2,88	2,77
Eurovent efficiency class	(1)		B	B	B	B	C	C
ESEER*			3,84	3,91	3,80	3,79	3,74	3,66
SEER 12/7			3,71	3,68	3,58	3,56	3,53	3,68
Heating								
Heating capacity	(2)	kW	104,8	118,0	145,1	161,0	174,4	204,4
COP	(2)		3,42	3,43	3,40	3,38	3,36	3,32
Eurovent efficiency class	(2)		A	A	A	A	A	A

(1) External air temperature 35°C, user-side heat exchanger water inlet/outlet temperature 12/7°C. Values in accordance with EN 14511.

(2) Outside air temperature 7°C DB, 6°C WB; condenser inlet/outlet water temperature 40/45°C. Values in accordance with EN 14511.

(5) Values obtained from measurements made according to ISO 3744, with the unit operating in nominal condition (according to condition 1) without any accessory. Binding values.

(6) Value derived from the noise power level. Reference distance 10 meters from the unit in free field conditions with directivity factor Q=2. Non-binding value.

(9) User-side heat exchanger water inlet/outlet temperature 30/35, Average climate profile, with reference to regulation 2013/813 and norm EN 14825.

(10) User-side heat exchanger water inlet/outlet temperature 47/55°C, Average climate profile, with reference to regulation 2013/813 and norm EN 14825.

* Former Eurovent index, not certified from 2019; reference base unit.

LIITE 6: Taulukko, rakennusten lämmitysmuodot Suomessa vuonna 2023 [18].

	Rakennuksia (lkm.)							
	Yhteensä	Kauko- tai aluelämpö	Öljy, kaasu	Sähkö	Kivihiili	Puu, turve	Maa-lämpö	Maaläm-mön osuus rakennus-luokasta
KOKO MAA, OSUUS 2023		14,7 %	19,1 %	40,9 %	0,4 %	18,4 %	6,5 %	
Yhteensä	1 449 787	213 007	277 539	592 375	5 909	266 370	94 587	
0110, 0111 Omakoti- ja paritalot	1 168 379	74 158	228 419	505 885	5 524	252 315	81 992	7,0 %
0112 Rivitalot	85 192	41 304	11 731	25 710	23	582	5 103	6,0 %
012 Kerrostalot	67 069	54 521	5 715	2 886	83	995	2 645	3,9 %
013, 014 Asuntolara-kennukset ja erityisryh-mien asuinrakennukset	2 588	1 644	348	306	0	74	145	5,6 %
03 Liikerakennukset	32 373	8 013	6 478	10 911	50	2 179	950	2,9 %
04 Toimistorakennukset	10 503	5 140	1 762	2 773	12	231	203	1,9 %
05 Liikenteen rakennukset	47 677	2 302	3 580	14 389	30	1 438	453	1,0 %
06 Hoitoalan rakennukset	6 274	3 847	1 077	773	6	161	280	4,5 %
07 Kokoontumis-rakennukset	15 304	3 616	2 108	5 360	15	1 317	413	2,7 %
08 Opetusrakennukset	12 156	6 484	2 629	1 566	12	755	401	3,3 %
09 Teollisuuden ja kai-vannaistoiminnan raken-nukset	34 584	6 752	9 442	9 177	87	3 293	1 089	3,1 %
10 Energiahuolto-rakennukset	8 085	785	671	1 756	17	652	12	0,1 %
11 Yhdyskuntatekniikan rakennukset	6 638	448	363	2 974	4	223	50	0,8 %
12 Varastorakennukset	36 416	2 697	2 463	5 987	20	1 104	683	1,9 %
13 Pelastustoimen rakennukset	2 423	1 101	329	597	4	27	86	3,5 %
19 Muut rakennukset	4 533	195	424	1 325	22	1 024	82	1,8 %

LIITE 7: Lämmitysmuodon optimoinnin tulokset

Pistetalon optimointi

Vaihtoehto	Pää- lämmitys	Priihaus	PILP	Aurinko- paneeli	Ikkunat	Ilmanvaihto- järjestelmä	Jäteveden LTO	Energia- kustannus 25 v (€)	Elinkaari- kustannus 25 v (€)	Inves- toinnit (€)	Takaisin- maksuaika, diskontattu (vuotta)
VE3 42	IVLP	Kaukolämpö	Ei	Ei	Kunnostetaan alkuperäiset	Kunnostetaan alkuperäiset	Ei	-214000	-124700	62600	8,4
VE4 68	IVLP	Kaukolämpö	Ei	50 m2	Kunnostetaan alkuperäiset	Kunnostetaan alkuperäiset	Ei	-227700	-119400	75100	9,6

Lamellitalon optimointi

Vaihtoehto	Pää- lämmitys	Priihaus	PILP	Aurinko- paneeli	Ikkunat	Ilmanvaihto- järjestelmä	Jäteveden LTO	Energia- kustannus 25 v (€)	Elinkaari- kustannus 25 v (€)	Inves- toinnit (€)	Takaisin- maksuaika, diskontattu (vuotta)
VE4 332	IVLP	Kaukolämpö	Ei	Ei	Kunnostetaan alkuperäiset	Kunnostetaan alkuperäiset	Ei	-369700	-217200	110200	8,4
VE5 235	IVLP	Kaukolämpö	Ei	200 m2	Kunnostetaan alkuperäiset	Kunnostetaan alkuperäiset	Ei	-453400	-232800	159600	10,2

Piste- ja lamellitalojen lämmitysmuoto-optimoinnin tulokset [45, s. 10].

LIITE 8: IVLP käyttöönottotarkastuspöytäkirjojen yhteenveto [53].

Kohde	Käyttöönotto	Cooling Unit Model	Ulkolämpötila (°C)	Kylmäaine	Laudutinpaine (bar)	Höyrystymispaine (bar)	Tuloneste (°C)	Menoneste (°C)	Lämpötilaero (°C)
Kohde 2	05.04.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 4.2	15,5	R-410A	30,31	7,79	42,4	47,6	5,2
Kohde 3	12.04.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 3.2	10,7	R-410A	27,12	5,89	40,5	43,6	3,1
Kohde 4	12.04.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 3.2	16,1	R-410A	27,7	8,12	41,4	47	5,6
Kohde 5	16.09.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 9.2	15	R-410A	21,78	7,62	34,2	39,6	5,4
Kohde 6 ¹⁾	06.06.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 4.2	24,1	R-410A	18,5	7,59	30,5	27,3	-3,2
Kohde 7	N/A	ZETA REV HP XT 1PS LN 5.2	13,7	R-410A	20,69	7,46	26,2	32,8	6,6
Kohde 8	15.09.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 9.2	14,2	R-410A	19,85	7,74	23,6	32,4	8,8
Kohde 9	03.02.2023	ZETA REV HP XT 1PS LN 3.2	-3,8	R-410A	32,11	4,12	47,2	52,6	5,4
Kohde 10	19.05.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 3.2	17,5	R-410A	19,9	6,7	24,8	32,5	7,7
Kohde 11	19.10.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 10.4	11	R-410A	22,36	7,16	30,5	37,2	6,7
Kohde 12	03.02.2023	ZETA REV HP XT 1PS LN 3.2	-3,5	R-410A	30,37	4,01	45,7	51,6	5,9
Kohde 13	07.10.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 7.2	11	R-410A	21,9	6,97	29,2	35,6	6,4
Kohde 14	07.10.2022	ZETA REV HP XT 1PS LN 10.4	11	R-410A	18,18	7,07	21,6	29,7	8,1

1) Kohde 6 on otettu käyttöön 24,1 °C lämpötilassa, jolloin lämmitysverkoston asetusarvo on ollut tätä pienimpi ja lämpöpumppu on toiminut jäähdytlaitteena