

Tutkimusraportti

HIILINEUTRAALIT ENERGiaratkaisut JA LÄMPÖPUMPPUTEKNOLOGIA (HYBE)

**Rakennusten energiatehokkuustoimenpiteiden
mitattu vaikutus ja raportoinnin haasteet**

Kirjoittajat

Janne Hirvonen
Natalia Lastovets
Piia Sormunen

TIIVISTELMÄ

Rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi on kehitelty monenlaisia ratkaisuja, joita tarkastellaan erityisesti simulaation keinoin. Tieto todellisten järjestelmien toiminnasta jää kuitenkin helposti hämärän peittoon, koska edes energiajärjestelmien suunnittelutoimistoilla ei ole pääsyä toteutettujen järjestelmien käyttövaiheen kulutustietoihin. Tässä tutkimuksessa kerättiin mittaustietoa Suomessa toteutetuista energiatehokkuusratkaisuista, keskittyen pääosin lämpöpumppuihin.

Lämpöpumppujen energiatehokkuuden määrittäminen on usein hankalaa, sillä erilliset mittaukset lämpöpumppujärjestelmästä puuttuvat. Tarkastelluissa kohteissa lämpöpumppujen kausilämpökerroin (SPF) vaihteli välillä 2,8–5,5. Datasta ei havaittu selkeää suhdetta rakennuksen iän tai rakennustyyppin ja lämpöpumpun lämpökertoimen välillä, mutta PILP-järjestelmien lämpökertoimet olivat puhtaita MLP-järjestelmiä korkeampia. Kaukolämpö-lämpöpumppu-hybridijärjestelmissä lämpöpumpun energiapitoisuus vaihteli välillä 30–80 %. Lämpöpumppujen tuottaman lämmön hinta ostosähkön hinnan ja toteutuneen lämpökertoimen mukaan oli 24–37 €/MWh. Lämpöpumppujen käyttämän sähkön hinta oli 3–29 % korkeampi kuin spot-hintojen keskiarvo, mikä osoittaa potentiaalin optimoinnille.

Vaikka lämpöpumput lähtökohtaisesti kasvattavat sähkönkulutusta, palvelurakennuksissa, joissa toteutettiin myös muita energiatehokkuusparannuksia (esim. valaistuksen, ilmanvaihdon ja ohjauksen muutoksia), saattoi sähkönkulutus jopa laskea lämpöpumpun lisäyksestä huolimatta. Lämpöpumppujen energiatehokkuuden määrittämisessä olisi tärkeää pystyä tunnistamaan myös apulaitteiden (pumppujen) käyttämä sähkö sekä ymmärtää laskentaan sisällytettävät taserajat (varalämmitys sekä lämmön ja kylmän yhteistuotanto), sillä nämä vaikuttavat merkittävästi lämpökertoimeen.

Energiadatan keräämisessä tunnistettuja kehitystarpeita olivat ylipäänsä järjestelmäkohtaisten mittausten toteutus riittävällä aikaresoluutiolla ja riittävän pitkällä aikavälillä sekä mittauskatkojen ja mittausvirheiden automaattinen tunnistaminen ja huoltotoimenpiteiden käynnistäminen. Energiadatan vertailukelpoisuuden ja optimointitarpeiden havaitsemiseksi tulisi tietää energiatehokkuus eri olosuhteissa. Sähkön hintojen vaihtelu on moninkertaistunut, joten on tärkeä myös tietää järjestelmien käyttämän sähkön ja tuotetun lämmön toteutunut hinta. Eri datalähteiden integrointi (esim. energia- ja olosuhdetiedot, järjestelmäkuvaukset, hintatiedot) edistäisi järjestelmien kokonaistehokkuuden ymmärtämistä.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä.....	i
1. Johdanto	1
2. Menetelmät.....	3
2.1 Tutkimusasetelma ja rajaus.....	3
2.2 Kirjallisuuskatsaus.....	3
2.3 Tapauskohteet ja aineistot	4
3. Kirjallisuuskatsaus.....	5
3.1. Järjestelmäkohtaiset suorituskkyindikaattorit ja energiatehokkuusvaje	5
3.2. Lämpöpumput ja hybridijärjestelmät: mitattu suorituskky, ohjaus ja järjestelmien vuorovaikutus ...	6
3.3. Energiahankkeiden tietokannat ja aineiston vertailukelpoisuus	6
3.4. Järjestelmärajaukset, mittaukset ja epävarmuus.....	8
3.5 Ohjaus ja mittarointi.....	8
3.5.1 Suorituskkyindikaattorien luokittelu	9
3.5.2 Ohjauksen kypsyysindeksi ja evidenssityyppi.....	9
4. Tapaustutkimukset Suomesta	13
4.1. Sähkövarasto	13
4.2. Jäteveden lämmöntalteenotto	15
4.3. Lämpöpumppujärjestelmät	18
4.3.1. Lämpöpumppujen vaikutus energiankulutukseen	18
4.3.2. Lämpöpumppujen energiatehokkuus	21
4.3.3. Lämpöpumppujen käyttökustannukset	22
4.3.4. Hybridilämpöpumppujärjestelmät	24
4.4 Aurinkoenergiajärjestelmät	28
5. Dataan liittyvät haasteet ja suositukset	30
5.1. Datan haasteet.....	30
5.1.1. Datan puuttuminen	31
5.1.2. Ei-standardimuotoinen data	31
5.1.3. Osittainen ja vaikeasti saatavilla oleva data.....	31
5.1.4. Datan resoluutio ja varastointiongelmät.....	32
5.1.5. Tietoturvallisuus	32
5.2. Energiatehokkuuden raportoinnin suositukset	33

5.2.1.	Lämpöpumppujärjestelmät.....	33
5.2.2.	Lämmöntalteenotto	34
5.2.3.	Energiavarastot	34
5.2.4.	Aurinkoenergiajärjestelmät.....	35
5.2.5.	Älykkäät ohjausjärjestelmät	35
5.2.6.	Energia raportoinnin esimerkkipohjia	35
6.	Johtopäätökset	37
	Lähteet.....	38

1. JOHDANTO

Suomessa rakennusten energiasuoritusvaatimukset ovat murroksessa. Kaukolämmön ominaispäästöt laskevat polttoainejakauman muutoksen myötä, ja samanaikaisesti hajautetut ratkaisut, kuten lämpöpumput, ilmanvaihdon lämmöntalteenotto (LTO), aurinkosähkö sekä akku- ja lämpövarastot, yleistyvät erityisesti korjausrakentamisessa. Kehitys lisää tarvetta arvioida ratkaisujen toimivuutta todellisissa käyttöolosuhteissa mitatun datan perusteella, eli miten energiankulutus, huipputeho ja päästöt muuttuvat, ja miten tuloksiin vaikuttavat järjestelmärajaukset, mittarointi sekä ohjauksen toiminta. Suomessa rakennusten energiatehokkuutta ohjaavat uudistettu rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD (Directive (EU) 2024/1275), uusi rakentamislaki ja niihin liittyvä sääntely, jotka yhdessä kiristävät energiatehokkuus- ja päästövaatimuksia sekä korostavat mitattuun tietoon perustuvaa seurantaa ja raportointia. Tämä kehitys lisää tarvetta ymmärtää, miten valitut energiatehokkuustoimenpiteet ja hybridijärjestelmät toimivat todellisissa käyttöolosuhteissa.

Toteutunut energiatehokkuus ja kustannustaso eivät kuitenkaan riipu pelkästään valitusta teknologiasta, vaan ennen kaikkea ohjausstrategioista, mitoituksista, käyttöprofiileista ja mittaustarkkuudesta. Suunnittelu- ja simulointitulokset antavat lähtökohdat investointipäätöksille, mutta liiketoimintapäätösten tueksi tarvitaan myös mitattuun käyttödataan perustuvaa näyttöä. Kansainvälisessä kirjallisuudessa on toistuvasti havaittu ns. energiatehokkuusvaje: laskennallinen energiankulutus aliarvioi usein mitattua kulutusta tyypillisesti kymmenillä prosenteilla, ja erot liittyvät muun muassa käyttöprofiileihin, sisälämpötiloihin, säätöihin ja toteutuksen laatuun (De Wilde, 2014; van den Brom et al., 2018; van Dronkelaar et al., 2016). Suomalaisen tapaustutkimusten perusteella kerrostalojen ja palvelurakennusten energiankulutus voi poiketa laskennallisesta tasosta muun muassa sisälämpötilojen, käyttöaikojen ja talotekniikan säädön vuoksi (Hartikainen, 2014; Korttinen, 2023; Pyly & Kurnitski, 2021). Myös suomalaisissa kohteissa on havaittu, että ilmanvaihdon ja lämpöpumppujen toiminta voi poiketa suunnitteluoletuksista, ellei järjestelmien toiminnanvarmistusta ja mittarointia ole suunniteltu riittävän tarkasti (Kilpeläinen et al., 2023; Pyly & Kurnitski, 2021).

Suomessa rakennusten energiatehokkuutta tarkastellaan E-luvun tai muun koko rakennuksen energiankulutusindikaattorin avulla, jolloin tarkastelu painottuu koko rakennuksen vuotuisen energiankulutukseen standardikäytöllä (Ympäristöministeriö, 2024). Rakennusten energiatehokkuuden vertailuluku ei kuitenkaan paljasta, miten eri talotekniset järjestelmät todellisuudessa toimivat, miten kuormat jakautuvat LVI-alijärjestelmiin tai miten sisäolosuhteet ja käyttäjäkokemukset toteutuvat (Abu Bakar et al., 2015). Tämän vuoksi kansainvälisessä tutkimuksessa on korostettu järjestelmätason suorituskykyindikaattoreita sekä käyttöönotto- vaiheen jälkeistä arviointia (POE, post-occupancy evaluation), jossa mitatut rakennusten energiatiedot yhdistetään sisäolosuhteisiin ja käyttökontekstiin (Elsayed et al., 2023; H. Li et al., 2020; P. Li et al., 2018). Järjestelmätason tarkastelu edellyttää selkeitä taserajoja ja riittävää mittausdataa, jotta esimerkiksi lämpöpumppujen SCOP/SPF ja ilmanvaihdon LTO-hyötysuhde voidaan arvioida vertailukelpoisesti (AECOM Ltd, 2024; Pyly & Kurnitski, 2021).

Hybridijärjestelmien kustannustehokkuus energiaremonteissa sidotaan yhä enemmän tekijöihin, kuten tehoon ja ajoitukseen, sen sijaan, että keskityttäisiin pelkästään vuotuisen energiankulutukseen (Kontu et al., 2019). Tämä trendi näkyy erityisesti kaukolämmön ja sähkön teho- ja kapasiteettikomponenteissa: huipputehojen hallinta vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin ja energiaverkon mitoitukseseen (Helen Oy, 2023; Kuopion Energia, 2024). Energiatehokkuuden käsite laajenee näin pelkästä energiankulutuksesta kulutuksen

ajoitukseen ja kustannusoptimointiin. Kenttä- ja tapaustutkimukset osoittavat, että lämpöpumppujen laajamittainen käyttöönotto voi nostaa sähkötehon huippuja, jolloin hybridienergiaratkaisut ja ohjaus ovat keskeisiä riskienhallinnan ja kustannusoptimoinnin työkaluja (Hirvonen et al., 2019; Kallioharju et al., 2025). Samalla kaukolämpöverkkoihin integroituvat hajautetut lämpöpumput ja prosumer-ratkaisut muuttavat tuotannon ja kulutuksen työnjakoa, mikä edellyttää ohjaukselta ja mittaukselta selkeitä rajoituksia ja läpinäkyvää KPI-raportointia (Kuosa et al., 2019; Pesola, 2023; Rupar-Gadd et al., 2025).

Kirjallisuus tukee näkemystä, että älykäs ohjaus voi tuottaa kustannus- ja joustohyötyjä ilman, että käyttäjämukavuus välttämättä heikkenee, mutta tulokset ovat tapauskohtaisia ja riippuvat muun muassa ohjausstrategiasta sekä käyttäjäkäyttäytymisestä (Hargreaves et al., 2013; Thorsteinsson et al., 2023). Samalla EPBD:n yhteydessä kehitetty rakennusten älyindikaattori, Smart Readiness Indicator (SRI), pyrkii kuvaamaan rakennuksen kykyä reagoida käyttäjien ja energiajärjestelmän tarpeisiin, mutta tutkimukset korostavat, että pisteytyksen rinnalle tarvitaan mitattuja tuloksia todellisesta suorituskyvystä ja joustosta (Janhunen et al., 2019; Autio et al., 2024; Verbeke et al., 2020).

Pitkissä kenttäkokeissa hintasignaaliin reagoiva ennakoiva ohjaus on tuottanut mitattavia kustannushyötyjä, mutta tulosten yleistettävyyttä nojaa tunti-/varttitason dataan, luotettaviin ennusteisiin ja sisäolosuhderajoitteiden mallintamiseen (Thorsteinsson et al., 2023). Hybridilämpöpumppujen ohjauksessa ennakoivat menetelmät (MPC) voivat tuottaa mitattavia kustannussäästöjä ja samalla vaikuttaa optimaaliseksi muodostuvaan varaajakapasiteettiin (D’Ettorre et al., 2019). Lisäksi hybridilämpöpumppujen kenttäaineistoon perustuvassa analyysissä älykäs ohjaus mahdollistaa jouston ja taloudellisen optimoinnin, mutta lähtötilanteen arvio ja mittausrajat ratkaisevat, voidaanko vaikutus erottaa normaalivaihtelusta (Sun et al., 2019).

Tämän raportin tavoite on tuottaa kerättyyn mitattuun dataan perustuva kokonaiskuva siitä, miten Suomessa toteutetut energiatehokkuustoimenpiteet, hybridijärjestelmät ja ohjausratkaisut toimivat käytännössä. Raportissa kehitetään ja sovelletaan vertailukelpoisia suorituskykyindikaattoreita ja tarkastellaan erityisesti (i) järjestelmien hyötysuhteita (COP, SCOP/SPF), (ii) energiateitoa ja energianlähteiden osuuksia, (iii) huipputehoja sekä (iv) kustannusvaikutuksia todellisissa käyttöolosuhteissa. Luvussa 2 esitellään käytetyt menetelmät ja aineisto, luvussa 3 käydään läpi kirjallisuuskatsauksen löydöt, luvussa 4 tutustutaan suomalaisista energiatehokkuuskohteista kerättyyn mitattuun tietoon ja luvussa 5 kerrotaan mittausdatan ja energia-analyysin haasteista tämän selvityksen havaintojen pohjalta. Lopuksi luvussa 6 esitetään tutkimuksen johtopäätökset.

Tutkimuskysymykset

TK1: Miten toteutetut energiatehokkuustoimenpiteet ja energiajärjestelmämuutokset vaikuttavat rakennusten energiankulutukseen ja huipputehoon mitatun datan perusteella?

TK2: Millaisia mitattuja hyötysuhteita erilaisilla järjestelmillä saavutetaan?

TK3: Mitä haasteita liittyy rakennusten energiajärjestelmien energiatehokkuusanalyysiin ja miten ne vaikuttavat tulokseen?

TK4: Miten energiaraportointia ja älyvalmiuden arviointia tulisi kehittää, jotta mitattu tieto tukee paremmin investointipäätöksiä ja sääntelyä?

2. MENETELMÄT

Raportin menetelmäkokonaisuus muodostuu kirjallisuuskatsauksesta ja tapauskohtaisesta mittausaineiston analyysistä. Tarkastelu kohdistuu rakennustason energiajärjestelmiin ja niiden alijärjestelmiin siltä osin kuin mittauspisteet ja historiadata mahdollistavat luotettavan tulokinnan.

2.1 Tutkimusasetelma ja rajaus

Tässä raportissa tarkastellaan hybridi- ja lämpöpumppupohjaisten energiaratkaisujen toteutunutta suorituskykyä sekä raportointikäytäntöjä mitatun energiadatan perusteella. Menetelmäkokonaisuus on yhdistelmä kirjallisuuskatsausta ja tapauskohtaista data-analyysia. Kirjallisuuskatsauksen rooli on määrittellä järjestelmätason tarkastelun periaatteet, vertailukelpoiset suorituskykyindikaattorit sekä keskeiset laadunvarmistuksen ja mittausepävarmuuden näkökohdat. Data-analyysin rooli on soveltaa näitä periaatteita suomalaisiin toteutuneisiin kohteisiin ja muodostaa niiden pohjalta johtopäätökset energiatehokkuusvaikutuksista, hyötysuhteista sekä datan ja raportoinnin kehitystarpeista.

Tarkastelu rajataan rakennustason energiavirtoihin ja energiajärjestelmän osajärjestelmiin siltä osin kuin mittauspisteet ja historiadata mahdollistavat luotettavan laskennan. Kaikkia indikaattoreita ei voida laskea kaikille kohteille, koska mittarointitaso, aikaresoluutio ja datan kattavuus vaihtelevat kohteittain. Tulokset raportoidaan vain niiltä osin kuin tarvittavat perusmittaukset ovat saatavilla ja järjestelmärajaus voidaan määrittellä yksiselitteisesti.

2.2 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa tutustuttiin alan tieteelliseen tutkimukseen sekä julkisiin raportteihin ja tietokantoihin. Kirjallisuuskatsaus toteutettiin kirjallisuushakuna ja systemaattisena sisältöanalyysinä siten, että lähteet valittiin tukemaan kylmän ilmaston rakennusten energiajärjestelmien tarkastelua ja raportin tutkimuskysymyksiä. Aineistoon sisällytettiin ensisijaisesti julkaisuja ja raportteja, joissa järjestelmien suorituskyky perustuu mitattuun aineistoon tai pitkälle kalibroituun tuloksiin ja joissa järjestelmärajaukset sekä suorituskykyindikaattorien laskenta on kuvattu riittävällä tarkkuudella. Katsauksessa hyödynnettiin järjestelmätason arvioinnin viitekehystä ja indikaattorimäärittelyjä, joissa korostuvat taserajojen ja mittauspisteiden yksiselitteisyys sekä mittausepävarmuuden huomiointi (Li et al., 2020; AECOM Ltd, 2024; Spitler et al., 2021).

Kunkin lähteen keskeiset tiedot kirjattiin yhtenäisellä lomakkeella, jotta eri lähteiden tulokset saatiin vertailukelpoiksi. Kirjattavia tietoja olivat järjestelmän kokoonpano ja järjestelmärajaukset, mitatun aineiston kattavuus ja aikaresoluutio, raportoidut suorituskykyindikaattorit sekä ohjausratkaisujen luonne ja edistyneisyys. Lähteet luokiteltiin evidenssityypin mukaan ja niiden raportointikäytäntöjä tarkasteltiin erityisesti sen näkökulmasta, millä tarkkuudella mitattu tieto mahdollistaa järjestelmätason suorituskyvyn todentamisen. Luokittelun tulokset raportoidaan liitteessä, ja niitä hyödynnetään kirjallisuussynteessissä, jossa muodostetaan kehys raportin tapaustutkimusten indikaattorivalinnoille ja tulkinnalle.

2.3 Tapauskohteet ja aineistot

Data-analyysissä etsittiin Suomesta tutkimuskohteiksi todellisia rakennuksia, joihin on toteutettu erilaisia energiaratkaisuja. Mittausdatan heikko saatavuus oli kuitenkin haaste data-analyysin toteuttamisessa. Pääpaino selvityksissä oli lämpöpumppujärjestelmissä, mutta dataa saatiin myös jäteveden LTO-järjestelmistä sekä sähköakku- ja aurinkosähköjärjestelmistä.

Mittausdataa saatiin energiakonsulteilta ja isoilta kiinteistöomistajilta. Tietoa kerättiin Fidelix-etävalvomosta, Enerkey-tietokannasta, energiavarasto-operaattorin raporteista sekä yhteistyökumppaneiden lähettämistä Excel-tiedostoista. Tietoja analysoitiin Excel- ja Python-alustoilla.

Empiirinen analyysi perustui tapauskohtaisiin aikasarjoihin, jotka sisälsivät lähteestä riippuen tunti-, vuorokausi- ja kuukausitason tietoja. Energiadata kattoi kaukolämmön kulutuksen sekä vaihtelevasti eri järjestelmätasojen sähkönkulutukset, kuten rakennuksen kokonaiskulutuksen, lämpöpumpun, apulaitteet ja lisälämmityksen. Olosuhdeaineistona hyödynnettiin saatavilla olevia ulkolämpötilan ja järjestelmän lämpötilan tietoja. Salassapitovelvollisuuksien mukaisesti mittausdata esitettiin ilman kohdekohtaisia tunnistetietoja.

Indikaattorit valittiin siten, että ne tukevat tutkimuskysymyksiä ja ovat mahdollisimman vertailukelpoisia kohteiden välillä. Laskenta perustuu energiataseisiin, teho- ja aikaulottuvuuden tarkasteluun sekä kustannussignaalin ja kulutuksen ajoittumisen yhdistämiseen silloin, kun tuntitason data on käytettävissä. Lämpöpumppujen suorituskykyä kuvattiin lämpökertoimen ja kausisuorituskyvyn avulla, ja tarkastelussa huomioitiin myös apulaitteiden ja lisälämmityksen vaikutus lämpökertoimiin (AECOM Ltd, 2024; Spitler et al., 2021). Aurinkosähkön osalta tarkasteltiin oman käytön osuutta ja kulutuksen kattamista. Energiavarastoissa tarkasteltiin varastointihyötysuhdetta sekä varastosykliden määrää käyttöaktiivisuuden mittarina.

3. KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä luvussa syvennetään Johdannossa esiteltyä viitekehystä ja tarkastellaan, mitä kansainvälinen ja suomalainen kirjallisuus kertoo järjestelmäkohtaisesta suorituskyvystä, hybridienergiajärjestelmistä, älykkäistä ohjausstrategioista ja älyvalmiudesta. Painopiste on mitattuun tai pitkälle kalibroituihin tuloksiin perustuvissa tutkimuksissa, jotka ovat vertailukelpoisia hankkeen tapauskohteiden kanssa. Katsauksen tavoitteena on varmistaa, että luvuissa 3.2–3.4 käytetyt vertailusuureet ja johtopäätökset perustuvat yhdenmukaiseen järjestelmätason tarkasteluun.

3.1. Järjestelmäkohtaiset suorituskyyindikaattorit ja energiatehokkuusvaje

Rakennusten energiatehokkuutta kuvataan usein energiankäytön intensiteetillä (esim. kWh/m²,a), mutta tällaiset koko rakennuksen mittarit eivät yksin kerro, miten suorituskyy jakautuu alijärjestelmiin (lämmitys, jäähdytys, ilmanvaihto, lämmin käyttövesi, valaistus ja laitesähkö) tai miksi suunniteltu hyöty ei toteudu (Abu Bakar et al., 2015). Järjestelmätason tarkastelussa tavoitteena on muodostaa kullekin järjestelmälle oma mittaristo, joka sisältää sekä intensiteetti- että hyötysuhdemittareita (esim. COP/SCOP/SPF, ominaissähkönkulutus, lämpötilatasot ja huipputeho) ja mahdollistaa energian käytön, tuotetun hyödyn ja kuormituksen dynamiikan tarkastelun (Li, H. et al., 2020).

Kirjallisuus osoittaa toistuvasti energiatehokkuusvajeen, että laskennallisten ja mitattujen lukujen välinen ero on usein merkittävä ja voi olla suuruusluokaltaan kymmeniä prosentteja. Eroja selittävät erityisesti käyttöprofiilit, sisälämpötilojen tavoitetasot, järjestelmien säädöt, toteutuksen laatu sekä puutteellinen mittarointi ja toiminnanvarmistus (De Wilde, 2014; Van Dronkelaar et al., 2016; Van den Brom et al., 2018). POE-lähestymistapa (post-occupancy evaluation) on vakiintunut kehys, jossa rakennuksen toteutunutta suorituskyyä tarkastellaan mitatun energiadatan, olosuhteiden ja käyttökontekstin avulla (Li, P. et al., 2018; Elsayed et al., 2023). POE ja järjestelmätason suorituskyyindikaattorit ovat keskeisiä, koska hankkeen tutkimuskysymykset kohdistuvat nimenomaan siihen, mitkä indikaattorit kuvaavat energiajärjestelmien energiatehokkuutta ja mitkä säästöt (energia, kustannus, päästöt) toteutuvat todellisissa kohteissa.

Kirjallisuudesta johdettuna vertailukelpoisen järjestelmäanalyysin kannalta keskeisiä periaatteita ovat:

- Taserajat ja mittauspisteet on määriteltävä mitä mitataan järjestelmätasolla ja mitä jää rajauksen ulkopuolelle, jotta COP/SCOP/SPF ja energiaperiteito voidaan laskea vertailukelpoisesti (Li, H. et al., 2020; AECOM Ltd, 2024).
- Teho- ja aikaulottuvuus on huomioitava huipputehot ja kuormituksen ajoittuminen vaikuttavat sekä järjestelmän mitoitukseen että kustannuksiin (Li, H. et al., 2020).
- Normalisointi tulee tehdä tarkoituksenmukaisesti (pinta-ala, käyttäjämäärä, käyttöaika), jotta käyttöprofiilien erot eivät vääristä johtopäätöksiä (Abu Bakar et al., 2015; Li, H. et al., 2020).
- Toiminnanvarmistuksen ja mittausten laadun merkitys on olennainen: puutteelliset säädöt, virheeliset asetusarvot tai mittausvirheet voivat heikentää suorituskyyä ja samalla estää luotettavan todentamisen (Kilpeläinen et al., 2023).

3.2. Lämpöpumput ja hybridijärjestelmät: mitattu suorituskyky, ohjaus ja järjestelmien vuorovaikutus

Lämpöpumppujen ja hybridijärjestelmien mitattu kausisuorituskyky vaihtelee merkittävästi kohteen, lämmönlähteen, jakelujärjestelmän lämpötilatasojen sekä ohjauksen mukaan. Suomalaisissa kerrostalokohteissa poistoilmalämpöpumppujen mitattu suorituskyky on osoittautunut herkäksi erityisesti järjestelmäkytkennöille ja lämpötilatasoille, mikä korostaa taserajojen ja mittausten huolellista määrittelyä (Pylsy ja Kurnitski, 2021). Maalämpöjärjestelmissä porakaivokentän mitoitus ja kuormitusprofiilit vaikuttavat pitkän aikavälin suorituskykyyn: liian suuri tehonotto tai alimitoitus voi heikentää kausihyötysuhdetta ja lisätä tarvetta huipputehon kattamiseen muilla lämmönlähteillä (Siren et al., 2025; AECOM Ltd, 2024).

Kansainväliset kenttätutkimukset tukevat samaa johtopäätöstä: pelkkä nimellisteho tai valmistajan ilmoittama hyötysuhde ei riitä, vaan tarvitaan mitattua aikasarjadataa ja selkeitä järjestelmärajauksia. Esimerkiksi maalämpöpumppujen kenttämittauksissa on raportoitu huomattavaa vaihtelua järjestelmä- ja lämpöpumpputason SCOP-arvoissa, ja erot liittyvät usein apulaitteisiin, lämpötilatasoihin sekä ohjaukseen (Abdel-Salam et al., 2021a; Abdel-Salam et al., 2021b; Aira et al., 2017; Han et al., 2016). Lähes nollaenergiarakennuksessa toteutetussa GSHP-sovelluksessa järjestelmäintegraatio on olennainen osa toteutunutta suorituskykyä, ei vain lämpöpumppu yksittäisenä komponenttina (Li, H. et al., 2017).

Hybridijärjestelmillä voidaan parantaa kokonaisuuden toimivuutta erityisesti silloin, kun huipputehoja kateetaan täydentävällä lämmönlähteellä ja ohjaus priorisoi tehokkainta tai tarkoituksenmukaisinta tuotantotapaa (Xu et al., 2021; Xue et al., 2024a). Peruskorjausten jälkeiset toteumat voivat jäädä tavoitteista esimerkiksi sisälämpötilojen nousun ja käyttöprofiiliin muutosten vuoksi, vaikka tekniset toimet olisivat olleet oikeansuuntaisia (Colclough et al., 2022; Cali et al., 2016).

Kenttädatan analyysiin perustuvassa tutkimuksessa älykäs ohjaus osoitti potentiaalia parantaa hybridilämpöpumppujen toimintaa ja hallita kuormitusta, mutta hyödyt riippuvat toteutuksen yksityiskohdista ja ohjauksen kohdefunktiosta (Sun et al., 2019). Hintasignaaliin ja ennustavaan ohjaukseen perustuvissa kokeissa on raportoitu mitattavia kustannusvaikutuksia, mutta myös riskejä, mikä korostaa ohjauksen validointia mitatulla datalla (Thorsteinsson et al., 2023). Lisäksi käyttäjien toiminta voi aiheuttaa suurta hajontaa toteutuksessa kulutuksessa myös automatisoiduissa rakennuksissa (Hargreaves et al., 2013; Van den Brom et al., 2018).

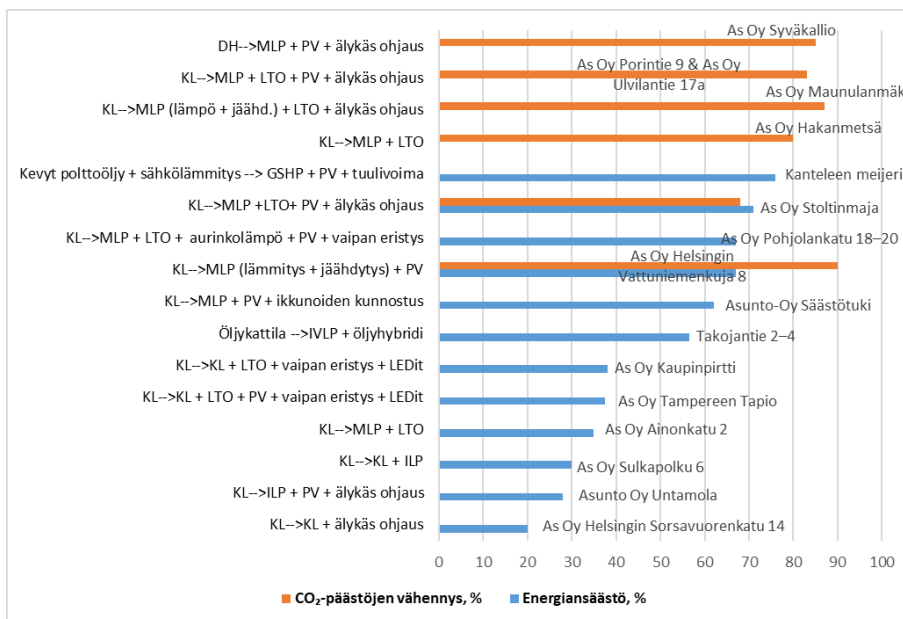
3.3. Energiahankkeiden tietokannat ja aineiston vertailukelpoisuus

Kirjallisuus ja käytännön koontiaineistot osoittavat kuitenkin samalla keskeisen rajoitteen: vertailukelpoisuus riippuu siitä, ovatko järjestelmärajaukset, mittauspisteet ja normalisointitapa yhdenmukaisia (Li, H. et al., 2020; IEA EBC, 2023). Jos osa järjestelmistä puuttuu mittauksista tai raportoidaan epäyhtenäisesti, johtopäätökset järjestelmätason hyötysuhteista voivat olla virheellisiä ja tapausten väliset erot voivat heijastaa mitaustapaa yhtä paljon kuin todellista teknistä suorituskykyä (Pylsy & Kurnitski, 2021; Kilpeläinen et al., 2023).

Osana Smart Energy Transition -hanketta Helsingin yliopisto ylläpitää tietokantaa energiatehokkuushankkeista (EnergiaKokeilut.fi), jotka liittyvät yksittäisiin rakennuksiin, kaupunginosaan ja jopa liikenne- ja liiketointamalleihin (Heiskanen, n.d.) Näistä hankkeista raportoidaan kuitenkin vain yleisellä tasolla ilman numeerisia tietoja toimenpiteiden vaikutuksista.

Aalto-yliopisto loi DigiDecarbon-hankkeessa tietokannan taloyhtiöiden tekemistä energiaremonteista (Energiashankkeet.fi) (Hyysalo & Savolainen, n.d.) Tiedot on kerätty muodollisemmin taulukoihin, mutta kaikissa julkaistuissa tapauksissa ei silti ilmoiteta kaikkia samoja tietoja tai käytetä samoja yksiköitä. Joissakin tapauksissa säästöt ilmoitetaan kokonaisenergiana, joskus lämmitysenergiana, toisinaan kustannussäästöinä tai yksinkertaisesti prosentteina. Energiaremontissa hyödynnetyt järjestelmät ilmoitetaan yleensä kvalitatiivisesti, mutta joissain tapauksissa on kerrottu myös esim. lämpöpumpun lämpöteho tai maalämpökentän koko. Eri osajärjestelmien hyötyjä ei pysty arvioimaan tietokannasta.

Kuva 1 näyttää kuitenkin erilaisten järjestelmäkoonpanojen kokonaissäästöt tietokannan raporttien mukaisesti. Erilaisilla lämpöpumppujärjestelmillä on saavutettu jopa 90%:n vähennys CO₂-päästöissä irrottamalla kaukolämmön piiristä. Raportoitu tieto ei kuitenkaan sisällä laskelmissa käytettyjä päästökertoimia. Suurimmat energiansäästöt liittyvät tyypillisesti laajempiin järjestelmämuutoksiin, joissa lämpöpumppu korvaa merkittävän osan aiemmasta lämmönhankinnasta ja kokonaisuutta täydennetään aurinkosähköllä tai lämmöntalteenotolla. Vastaavasti järjestelmän muutos voi tuottaa suuria vaikutuksia hiilidioksidipäästöön, mutta päästötulos ei ole yleistettävissä ilman tietoa käytetyistä päästökertoimista ja järjestelmärajauksesta. Älykäs lämmityksen ohjaus auttaa säästämään lämmitysenergiaa, mutta paljon merkittävämpi vaikutus on, kun se yhdistetään merkittäviin muutoksiin koko lämmitysjärjestelmässä.



Kuva 1. Energia- ja CO₂-vähennysten jakaumat Energiashankkeet.fi-tietokannan mukaan.

3.4. Järjestelmärajaukset, mittaukset ja epävarmuus

IEA:n HPT Annex 52 -kokonaisuus käsittelee nimenomaan lämpöpumppujärjestelmien pitkäaikaisen suorituskyvyn seurantaa, järjestelmärajauksia ja KPI-raportointia. Annex 52 -julkaisuissa korostetaan, että lämpöpumppujen suorituskykyä raportoidaan usein keskenään epäyhtenäisin mittarein ja rajauksin, mikä vaikeuttaa vertailuarvojen muodostamista (Gehlin et al., 2022). Eri osapuolet voivat hyödyntää suorituskykyindikaattoreita monin eri tavoin, esim. investointipäätösten tekemiseen, käyttöönottotarkastuksiin sekä järjestelmien ylläpitoon ja vianhallintaan. Keskeinen suositus on, että järjestelmätason analyysi edellyttää (i) selkeitä taserajoja, (ii) mittauspisteiden johdonmukaista valintaa ja (iii) olosuhteiden huomioimista (Davis et al., 2021; Gehlin et al., 2022). Taloudellinen suorituskyky oli kuitenkin jätetty tarkastelujen ulkopuolelle.

Annex 52 -osaraportit huomioivat lämpöpumppujen toimintaa eri näkökulmista:

1. **Taserajat ja suorituskykyindikaattorit (KPI):** suorituskykyindikaattorien hyödyt ja lämpöpumppujärjestelmäkokonaisuuden eri osien pitkän aikavälin suorituskyvyn määrittäminen (Gehlin et al., 2022)
2. **Mittarointisuositukset ja resoluutio:** mitä kannattaa mitata, miten anturit sijoitetaan ja millä aikaresoluutiolla mittauksia toteutetaan (Davis et al., 2021).
3. **Epävarmuuden käsittely:** miten mittausvirheet ja laskennalliset epävarmuudet vaikuttavat KPI:hin ja vertailtavuuteen (Spitler et al., 2021).
4. **Tapausraportoinnin malli:** tiivistetyt suorituskykyraportit Euroopassa toteutetuille maalämpökohteille ja raportointirunko, jota voidaan soveltaa hankkeiden toiminnan raportointiin (Gehlin & Spitler, 2022).

Kirjallisuus osoittaa, että energijärjestelmien vaikuttavuuden arviointi vaatii järjestelmätason KPI-kehikkoa, selkeitä taserajoja ja riittävää mittausdataa, koska toteutunut suorituskyky riippuu voimakkaasti ohjauksesta, käyttöprofiileista ja toteutuksen laadusta (De Wilde, 2014; Li, H. et al., 2020; Kilpeläinen et al., 2023). Lämpöpumppujen ja hybridijärjestelmien kenttätulokset korostavat erityisesti kylmän ilmaston, lämpötilatasojen ja järjestelmäkytkentöjen merkitystä (Pyly & Kurnitski, 2021; Siren et al., 2025). Ohjauksen osalta mitattu näyttö tukee potentiaalia, mutta myös tarvetta validoida vaikutukset (energia, kustannus, teho ja mukavuus) tapauskohtaisesti (Sun et al., 2019; Thorsteinsson et al., 2023). Näiden havaintojen pohjalta myöhemmissä luvuissa sovellettavat indikaattorit ja analyysit rakennetaan siten, että ne tukevat tutkimustavoitteita: toteutuneiden säästöjen todentaminen, järjestelmien vuorovaikutusten ja synergian tunnistaminen sekä päästö- ja kustannusvaikutusten arviointi mitatun datan puitteissa.

3.5 Ohjaus ja mittarointi

Kirjallisuusaineisto koodattiin systemaattisena sisällönanalyysinä, jotta eri lähteissä raportoidut tulokset saatiin vertailukelpoisiksi. Kustakin artikkelista tai raportista kirjattiin kolme asiaa: ohjauksen kypsyystaso, evidenssityyppi sekä raportoitujen suorituskykyindikaattorien kattavuus. Kuva 2 kokoa vertaisarvioidun

kirjallisuuden siten, että x-akseli kuvaa ohjausteknologian ja todentamisen kypsyystasoa ja y-akseli sitä, kuinka monipuolisesti tutkimus raportoi suorituskykyindikaattoreita.

3.5.1 Suorituskykyindikaattorien luokittelu

Kirjallisuus- ja tapausaineiston vertailtavuus edellyttää, että raportoitu suorituskyky jäsennetään yhtenäisiksi luokiksi. Luokittelu perustuu kahteen periaatteeseen: mitä voidaan mitata ja toistaa luotettavasti sekä mitä päätöksenteko käytännössä tarvitsee. Eri lähteissä käytetyt suorituskykyindikaattorit jaettiin seuraaviin kuuteen luokkiin: energia, kustannus, CO₂-päästöt, teho, sisäolosuhteet sekä lämpöpumpun tai järjestelmän hyötysuhde. Kirjallisuudessa raportoidut suorituskykyindikaattorit esitetään Taulukossa 1.

Energia-luokkaan kirjattiin kaikki tulokset, joissa raportoitiin energian käyttöä tai säästöä energiamääränä (esim. kWh, MWh, kWh/m²,a), ostoenergiaa (sähkö, kaukolämpö, polttoaine), tai lämmitys-/jäähdytysenergiaa. Tämä luokka vastaa rakennusten energiatehokkuuden perusmittaria, eli energian tarpeet ja kulutukset, mutta se toimii myös lähtötasona muiden suorituskykyindikaattorien (COP, SFP, CO₂e ja energiakustannus). *Kustannusluokkaan* raportoitiin energialasku, energian hinta, kustannussäästö tai kustannusoptimointi. *CO₂-luokkaan* kirjattiin sekä suoraan raportoidut päästöt että päästömuutokset (esim. kgCO₂, tCO₂ tai %). Luokka erotettiin energiasta, koska päästövaikutus riippuu energiamuodon päästöintensiteetistä ja voi muuttua ajassa. *Huipputeho-luokka* vaikuttaa sekä mitoittamiseen että kustannuksiin, ja erityisesti ohjaus- ja hybridistrategioiden liiketoimintalogiikka kytkeytyy usein juuri huipputehon maksuihin. *Sisäolosuhteet* kattaa lämpötilat ja sisäympäristön laatua kuvaavat muuttujat. *Hyötysuhdeluokkaan* kirjattiin kaikki COP-, SCOP- tai SPF-muotoiset suorituskykymittarit. Luokan erottelu energiasta on kriittinen, koska hyötysuhdeindikaattorit kuvaavat tuotetun lämpöhyödyn suhdetta sähköpanokseen ja siten järjestelmätehokkuutta, mutta tulos riippuu olennaisesti taserajasta, eli sisällytetäänkö apulaitteet, lisälämpö, varastohäviöt, jne.

Kunkin kirjallisuuslähteen kattavuus laskettiin seuraavaksi: lähteelle kirjattiin ne avainmittarityypit, joista raportoitiin mitattu tai eksplisiittisesti laskettu tulos, ei pelkästään mainittu. Suorituskykyindikaattorien lukumäärä on näiden uniikkien luokkien määrä. Esimerkiksi lähde, joka raportoi energian ja SPF:n, saa avainmittarityypeiksi energia sekä COP, SCOP ja SPF, ja lukumääräksi kaksi.

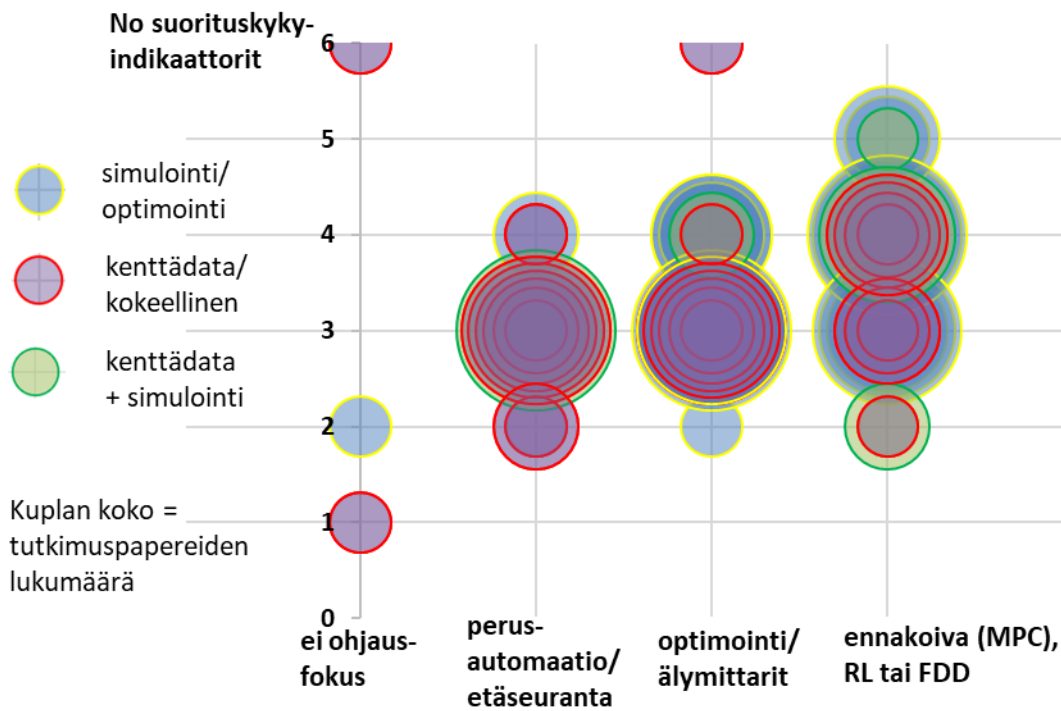
3.5.2 Ohjauksen kypsyysindeksi ja evidenssityyppi

Ohjauksen kypsyysindeksi määritettiin systemaattisena sisällönanalyysinä jokaisesta artikkelista: järjestelmä- ja menetelmäkuvauksista tunnistettiin, mitä ohjataan, millä mittauksilla ja millä tavoitteella. Luokitus kuvaa toiminnallista kysyyttä eikä ratkaisun paremmuutta.

Ohjauksen kypsyystaso määritettiin neliluokkaisena asteikkona:

- ei kuvattu / ei ohjausfokus: ohjaus ole tutkimuksen fokus tai ohjauslogiikkaa ei kuvata. Ohjausta ei kuvata käytännössä lainkaan tai korkeintaan maininta, eikä artikkeli kerro mitä säädetään, millä logiikalla tai millä mittauksilla. Tyypillistä suorituskykymittauksille, joissa ohjaus oletetaan tavanomaiseksi eikä sitä analysoida erillisenä vaikuttavana tekijänä.
- perusautomaatiota ja etäseurantaa. Kuvataan esim. käyräsäätö, perussäätö, kiinteistöhallintajärjestelmä, etäluentavalvonta tai hälytykset, mutta ei eksplisiittistä optimointifunktiota.
- optimointi ja älymittarit, jossa tavoite on määritelty, mutta toteutus on tyypillisesti sääntöpohjainen tai heuristinen ilman ennakoivaa mallia.
- mallipohjaisesti ennakoiva ohjaus (model-predictive control, MPC), vahvistusoppimista (reinforcement learning, RL) tai ennustava vikadiagnostiikka (Fault detection), joissa ohjaus tai valvonta on dynaamisesti datariippuvaista ja usein rajoitteellista.

Evidenssityyppi luokiteltiin kolmeen ryhmään: simulointi ja optimointi, kenttädata tai kokeellinen sekä kenttädata ja simulointi. Lähdekohtainen koonti on esitetty Taulukossa 1. Kuplan koko kuvaa tutkimusten lukumäärää ja väri evidenssityyppiä.



Kuva 2. Ohjausjärjestelmien edistyneisyys ja suorituskyyindikaattorien lukumäärän suhde kirjallisuudessa.

Energia ja hyötysuhde ovat kirjallisuudessa yleisimmin raportoidut tekniset indikaattorit, koska ne ovat suoraan johdettavissa energiavirroista sekä lämpöpumpun tai järjestelmän toiminnasta, kun taserajat on määritetty. Erityisesti lämpöpumppujen suorituskyyä käsittelevissä kenttätutkimuksissa painopiste on usein kausihyötysuhteessa ja energiankulutuksessa, mutta kustannus-, teho- ja CO₂-päästöt jäävät monissa tapauksissa toissijaiseksi (Li et al., 2015; Aira et al., 2017; Abdel-Salam et al., 2021; Chesser et al., 2021; Besagni et al., 2019; Popsueva et al., 2021; Sun et al., 2020; Zhi et al., 2025; Li et al., 2025).

Kustannus ja teho korostuvat ohjauksessa, kysyntäjoustossa ja energiahintarakenteissa. Näissä tutkimuksissa osoitetaan, että hyöty syntyy usein kulutuksen ajoituksen muutoksesta, tehomaksun leikkauksesta tai hinnan mukaan ohjaamisesta. Mutta jos mittausrajat eivät kata lämpöpumpun toimittamaa lämpöä ja apulaitteiden sähköä, ohjauksen vaikutusta järjestelmätason hyötysuhteeseen ei voida erottaa (Nilsson et al., 2018; Hirvonen et al., 2019; Ala-Kotila et al., 2020; Pesola, 2023; Ju et al., 2023; Xue et al., 2024a, 2024b; Kallioharju et al., 2025).

Hiilidioksidipäästöt esiintyvät kirjallisuudessa yleisimmin silloin, kun tarkastelu kytkeytyy järjestelmä- ja energijärjestelmätason päätöksentekoon, kuten kaukolämmön ja lämpöpumppujen suhteeseen tai hybridienergiajärjestelmien ympäristövaikutuksiin, mutta harvemmin suorituskyyymittauksissa (Kensby et al., 2015; Kensby et al., 2017; Lygnerud, 2021; Saffari et al., 2023; Woroniak et al., 2024; Söderholm et al., 2025).

Olosuhteet nousevat esiin erityisesti silloin, kun ohjaus optimoi kustannusta tai tehoa tai toteutetaan energiaremontti, jossa lämpötilatasot ja käyttötottumukset voivat muuttua (Hajian et al., 2022; Neubert, 2022; Baraskar et al., 2024; Li et al., 2017; Baumann et al., 2023; Neubert et al., 2024).

Keskeinen havainto ei ole, että edistyneempi ohjaus tuottaisi automaattisesti parempia tuloksia, vaan että ohjauksen kypsyys ja mitattavissa oleva todentaminen eivät kulje kirjallisuudessa systemaattisesti käsi kädessä. Mitä edistyneempi ohjaus, sitä enemmän tulos riippuu olosuhteista ja sitä suurempi on riski sekoittaa ohjauksen vaikutus säävaihteluun, käyttöprofiilin muutokseen, laitteiden ikääntymiseen tai vikaantumiseen. Suurin osa tutkimuksista raportoi vain yhden tai kaksi suorituskykyindikaattoria, ja kattavat mittaripaketit ovat harvinaisia. Yksi selitys voi olla se, että ohjauksen tavoitefunktio on usein rajattu ja osa tutkimuksista on luonteeltaan menetelmä- ja validointityötä, jossa mittauserojat ja ulkoiset häiriötekijät käsitellään rajoitetusti (D’Ettorre et al., 2019; Thorsteinsson et al., 2023; Ju et al., 2023; Xue et al., 2024a, 2024b).

Kirjallisuudesta voidaan tiivistää kolme käytännön mittarointitasoa:

- Perustaso: kokonaisenergia ja karkea normalisointi. Tällä tasolla voidaan todentaa energian muutos ja joskus karkea kustannus, jos hinnan laskeminen on yksinkertainen. Ohjauksen vaikutuksen erottaminen on silti epävarmaa, koska mittaus ei näe työnjakoa eikä reagoi käyttöön. Tämä näkyy tutkimuksissa, joissa raportoidaan vain yksi suorituskykyindikaattori tai kapea yhdistelmä ilman tarkkaa taseraajaa (Thalfeldt, 2018; Bellanco et al., 2021; Kuosa et al., 2019; Söderholm et al., 2025).
- Järjestelmätaso: alakohtainen energiamittaus ja taserajat. Kun lämpöpumpun käyttämä sähkö, luovutettu lämpö ja keskeiset lämpötilat tai virtaamat mitataan, voidaan raportoida suorituskykykertoimet vertailukelpoisesti ja tulkita ohjauksen vaikutusta järjestelmän toimintaan. Monet lämpöpumppujen kenttäsuorituskykytutkimukset asettuvat tälle tasolle (Li et al., 2015; Aira et al., 2017; Abdel-Salam et al., 2021a, 2021b; Chesser et al., 2021; O’Hegarty et al., 2022).
- Laajennettu taso: ohjaus-, olosuhde- ja hintadatan yhdistäminen, ennen ja jälkeen ja sää-/käyttönormalisointi. Tällä tasolla ohjauksen vaikutus voidaan erottaa perusvaihtelusta uskottavasti, koska mukana ovat sekä ohjauksen syötteet (hinta, ennuste, asetusarvot), ohjauksen toiminnot (ohjauslogiikka, priorisointi) että tulokset (energia, teho, kustannus, olosuhteet, hyötysuhde). Kenttäolosuhteissa tämä edellyttää käytännössä vähintään tuntitason, mielellään tiheämmän resoluution aikasarjoja sekä riittävän pitkää tarkastelujaksoa, jotta ikääntyminen ja poikkeamat eivät vääristä tulkintaa (Chen et al., 2022; Bi et al., 2024; Thorsteinsson et al., 2023; Nilsson et al., 2018; Baumann et al., 2023; Neubert et al., 2024; Melgaard et al., 2022).

Perusautomaatio voi olla paras taloudellinen ratkaisu kohteissa, joissa mittaus on rajoitettua, koska silloin edistyneen ohjauksen hyödyt jäävät varmentamatta ja väärintulkinnan riskit kasvavat. Toisaalta, kun mittauskehys rakennetaan minimidatan päälle ja yhdistää energian, tehon, kustannukset, olosuhteet ja tehokkuuden samaan taserajoitettuun raportointiin, edistyneemmästä ohjauksesta tulee näyttöä investointipäätösten tueksi.

Taulukko 1. Suorituskykyindikaattorit kirjallisuuslähteissä.

Lähde	DOI	Suorituskykyindikaattorit*		Tutkimus
		Suorituskykyindikaattorit (luokat)	määrä	
Thalfeldt et al. 2018	10.1016/j.applthermaleng.2017.09.033	E, SCOP, huipputeho	3	Simulointi
Saffari et al. 2023	10.1016/j.enbuild.2023.113256	E, SPF, CO ₂ , €	4	Simulointi
Lygnerud et al. 2021	10.1016/j.energy.2021.121202	E, COP, CO ₂ , €	4	Simulointi
Kensby et al. 2017	10.1016/j.egypro.2017.05.094	E, COP, CO ₂ , €	4	Simulointi
D’Ettorre et al. 2019	10.1016/j.applthermaleng.2018.11.063	E, COP, €	3	Simulointi
Xue et al. 2024	10.3390/buildings14061724	E, COP, CO ₂ , huipputeho, €	5	Simulointi
Pesola 2023	10.1016/j.energy.2023.128241	E, COP, huipputeho	3	Simulointi
Xue et al. 2024	10.3390/en17215428	E, COP, CO ₂ , huipputeho, €	5	Simulointi
Ju et al. 2023	10.3390/buildings13030573	E, huipputeho, olos., €	4	Simulointi
Söderholm 2025	10.3390/en18041003	E, COP, CO ₂	3	Simulointi
Fraga et al. 2017	10.1016/j.solener.2017.02.008	E, SPF	2	Simulointi
Hajian et al. 2022	10.1016/j.enbuild.2022.112174	E, huipputeho, olos.	3	Simulointi
Hirvonen et al. 2019	10.1080/14786451.2019.1613992	E, huipputeho	2	Simulointi
Gollamudi et al. 2024	10.1016/j.enbuild.2024.114209	E, COP, CO ₂ , €	4	Simulointi
Kuosa et al. 2019	10.1016/j.applthermaleng.2019.113745	E, COP, CO ₂ , €	4	Kenttädata
Wang et al. 2010	10.1016/j.enbuild.2010.06.022	E, COP, olos.	3	Kenttädata
Zhou et al. 2023	10.3390/en16196984	E, COP, huipputeho	3	Kenttädata
Shah et al. 2018	10.1016/j.applthermaleng.2018.07.135	E, COP, CO ₂ , huipputeho, olos., €	6	Kenttädata
Chesser et al. 2021	10.1016/j.enbuild.2021.111365	E, COP, olos.	3	Kenttädata
Thorsteinsson 2023	10.1016/j.apenergy.2023.121398	E, COP, olos. €	4	Kenttädata
Sun 2019	10.1016/j.apenergy.2019.04.068	E, COP, €	3	Kenttädata
Rupar-Gadd et al. 2025	10.1016/j.enbuild.2025.115897	E, €	2	Kenttädata
Ala-Kotila et al. 2020	10.3390/smartcities3020009	E, huipputeho, olos., €	4	Kenttädata
Baraskar et al. 2024	10.1016/j.seja.2023.100047	E, SPF, olos.	3	Kenttädata
Abdel-Salam et al. 2021	10.1016/j.enbuild.2021.110959	E, COP/SCOP, huipputeho, olos., €	6	Kenttädata
Aira et al. 2017	10.1016/j.renene.2017.07.099	E, COP/SPF, olos.	3	Kenttädata
Li et al. 2017	10.1016/j.energy.2017.02.108	E, COP, olos.	3	Kenttädata
Besagni et al. 2019	10.1016/j.renene.2018.08.076	E, COP, olos.	3	Kenttädata
Zhi et al. 2025	10.1016/j.renene.2025.122344	E, COP/SCOP, olos.	3	Kenttädata
Chao et al. 2012	10.1177/0143624412463571	E, COP, €	3	Kenttädata
Popsueva et al. 2021	10.3390/en14102745	E, €	2	Kenttädata
Sun et al. 2020	10.1016/j.solener.2020.03.030	E, CCOP/SCOP, huipputeho, olos.	4	Kenttädata
Sun et al. 2019	10.1016/j.apenergy.2019.04.068	E, COP, huipputeho, €	4	Kenttädata
Nilsson et al. 2018	10.1016/j.enpol.2018.07.044	E, teho, €	3	Kenttädata
O’Hegarty et al. 2022	10.1016/j.rser.2021.111887	E, COP/SPF, olos.	3	Kenttädata
Baumann et al. 2023	10.1016/j.enbuild.2023.112923	E, COP, olos., €	4	Kenttädata
Li et al. 2025	10.1016/j.enbuild.2025.115370	E	1	Kenttädata
Kallioharju et al. 2025	10.1049/icp.2025.2133	E, huipputeho	2	Kenttädata
Dai et al. 2015	10.1016/j.applthermaleng.2014.09.061	E, COP, olos.	3	Kenttädata
Kensby et al. 2015	10.1016/j.apenergy.2014.07.026	E, CO ₂ , olos.	3	Kenttädata
Neubert 2022	10.3390/en15155611	E, COP, CO ₂ , olos., €	5	Kenttädata ja simulointi
Woroniak et al. 2024	10.3390/en17112601	E, COP/SCOP, CO ₂	3	Kenttädata ja simulointi
Puttige et al. 2022	10.1016/j.enbuild.2022.112065	E, COP, CO ₂ , €	4	Kenttädata ja simulointi
Neubert et al. 2024	10.3390/en17061502	E, COP, CO ₂ , €	4	Kenttädata ja simulointi
Söderholm et al. 2025	10.3390/en18041003	E, COP	2	Kenttädata ja simulointi

*E = energia määränä, energiatarpeet, energiansäästö, jne; € = kustannus, hinta, energialasku; CO₂ = hiilidioksidipäästöt; huipputeho; olos. = sisäolo-suhteet; COP/SCOP/SPF = lämpöpumpun/järjestelmän suorituskyky.

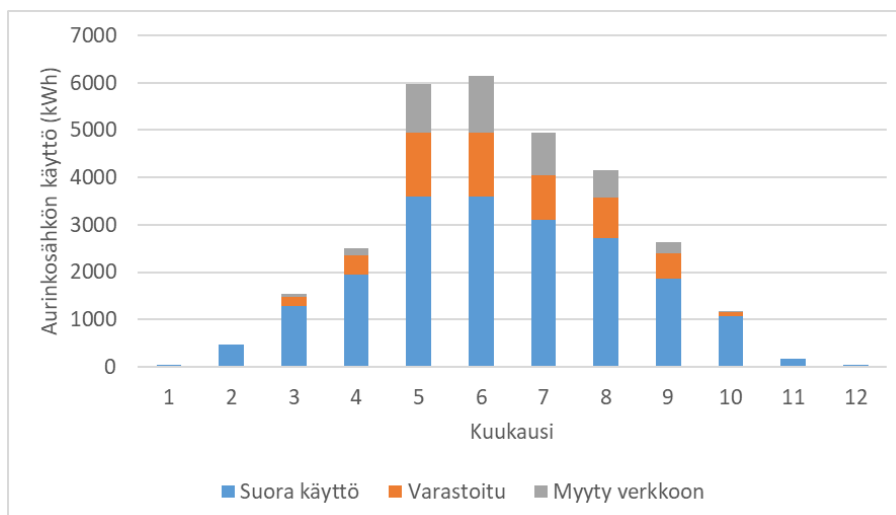
4. TAPAUSTUTKIMUKSET SUOMESTA

Seuraavissa luvuissa esitetään tutkimushankkeen puitteissa kerätyn suomalaisten rakennusten energijärjestelmien mittausdatan analyysiä.

4.1. Sähkövarasto

Helsinkiläiseen asuinkerrostaloon oli asennettu sähköakkuvarasto sekä aurinkosähköjärjestelmä. Energiavarastoa käytettiin aluksi vain taajuusohjatussa käyttö- ja häiriöreservissä (FCR-N), jossa rakennuksen sähkötehoja säädetään verkko-operaattorilta tulevien pyyntöjen mukaan verkkotaajuuden ylläpitämiseksi. Myöhemmin rakennus ja akkujärjestelmä kytkettiin myös sähkön spot-markkinaan, jossa pyritään optimoimaan energiankulutusta etukäteen tunnettujen sähkön tuntihintojen perusteella. Järjestelmää ohjasi erillinen energia-palveluoperaattori, jolle maksettiin operointipalkkiona 25% kulutusjoustopuotoista.

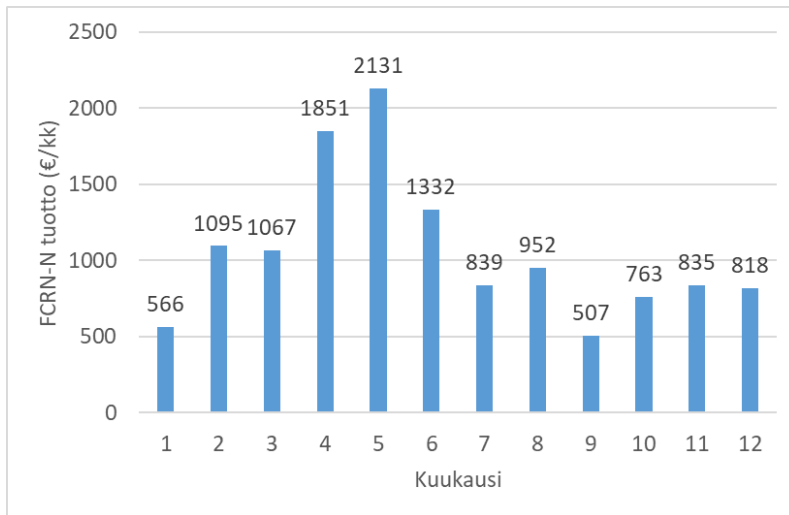
Akkujärjestelmän varastointikapasiteetti oli 100 kWh ja sen lataus- ja purkutehot olivat 30 kW ja 40 kW. Järjestelmän toimintaa raportoitii kuukausittain päivä- ja tuntitasolla. Raportti sisälsi akun ja kiinteistön tunti-kohtaiset energiavirrat. Energiavirroista voitiin laskea varaston hyötysuhteen olevan 82%, mutta tätä ei automaattisesti nähty raportista. Raportista pystyi havaitsemaan aurinkosähkön ylituotannon, mutta ei voinut tarkkaan määrittää miten paljon aurinkosähkö oli tuotettu ja miten sitä oli hyödynnetty. Yhdistämällä luke-miin erillistä aurinkosähkön mittausdataa tätä pystyttiin kuitenkin arvioimaan (Kuva 3). Aurinkosähkön kokonaistuotanto vastasi kolmasosaa vuotuisesta kulutuksesta. Tuotannosta 67% meni suoraan käyttöön, 19% varastoitii akkuun ja 14% myytiin verkkoon.



Kuva 3. Asuinkerrostalon aurinkosähkön käytön jakauma vuonna 2024.

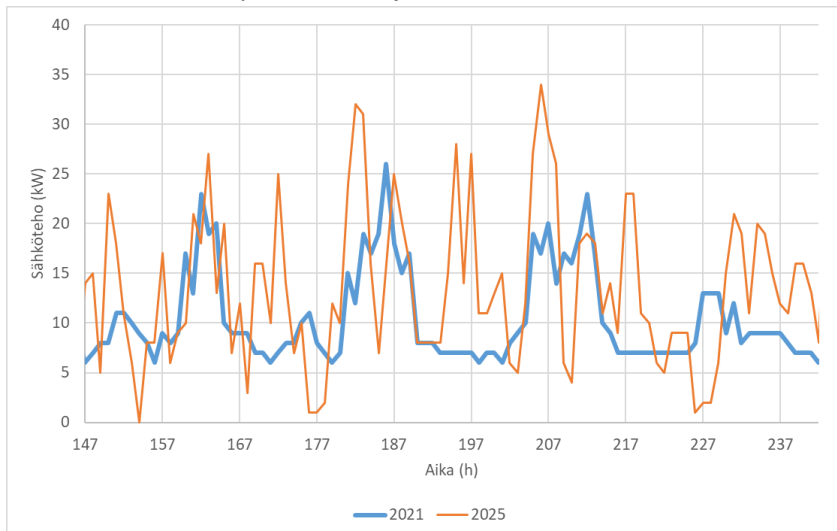
Operaattorin raporteista nähtiin, että FCR-N-markkinalle osallistuminen oli erittäin kannattavaa toimintaa (Kuva 4). Kuukausittainen vaihtelu oli suurta ja kuukausien välillä saattoi olla jopa nelinkertainen ero. Vuonna 2024 reservimarkkinatoiminnan tuotot olivat ~12 800 €, josta vähennettiin 25% operaattoriosuus. Kiinteistö-omistajan osuudeksi jäi siis ~9600 €. Jos akun hankintakustannus olisi 600 €/kWh, olisi takaisinmaksuaika vain

6 vuotta. Kuukausivaihtelun lisäksi kuitenkin myös vuositason tuotot vaihtelevat. Fingridin tietojen mukaan vuonna 2025 FCR-N-markkinan tuotot olivat laskeneet 60% vuoteen 2024 verrattuna (Fingrid Oyj, n.d.). Tämä johtunee markkinan lisääntyneestä akkukapasiteetista, mikä laskee kiinteistökohtaistenkin akkujen kustannushyötyjä.



Kuva 4. Akkujärjestelmä kuukausittaiset tuotot FCR-N-markkinalla vuonna 2024.

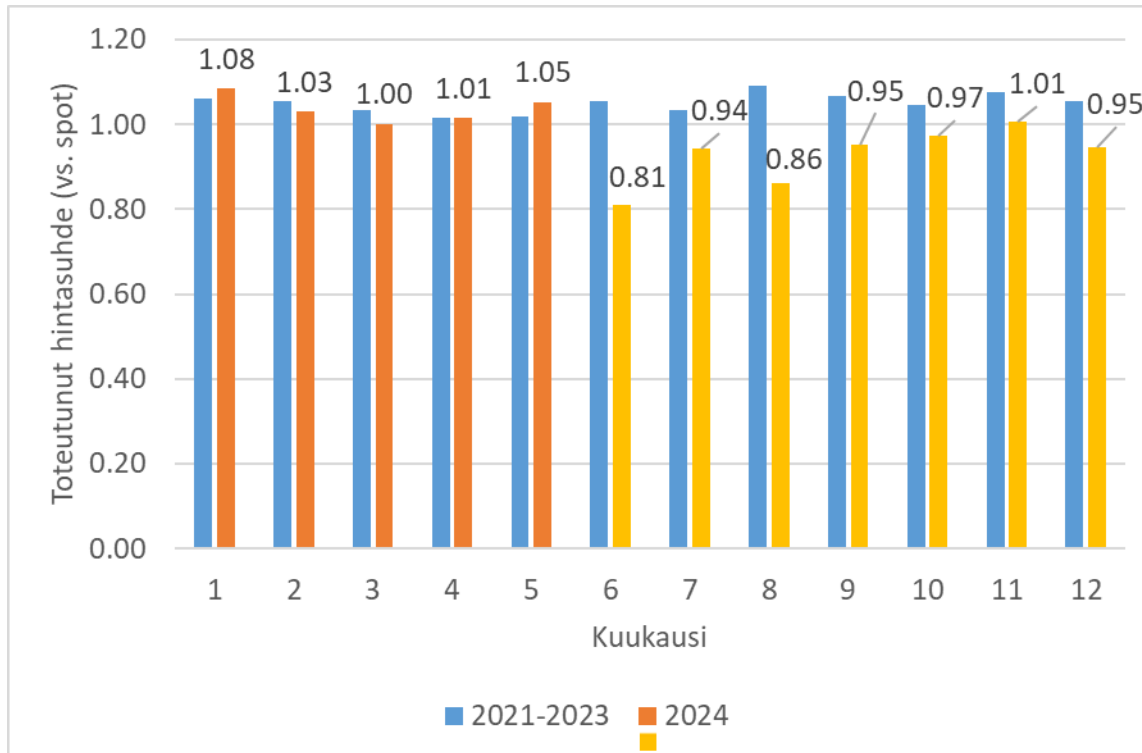
Käytetty akku lisäsi rakennuksen sähkönkulutuksen vaihtelua (Kuva 5). Kahden vuoden aikana ennen akun asennusta tehontarpeen keskihajonta oli 4,6 kW, mutta akun asennuksen jälkeen se kasvoi 52 % 7,0 kW:iin.



Kuva 5. Sähkätehon vaihtelu tammikuussa ennen akkujärjestelmää ja akkujärjestelmän käyttöönoton jälkeen.

Sähkön spot-markkinoille osallistuminen alensi sähköstä maksettavaa efektiivistä hintaa (Kuva 6). Ennen kuin akkua käytettiin spot-hinnan mukaisesti, keskimääräinen efektiivinen hinta oli 105 % keskimääräisestä spot-markkinahinnasta (2021/01 – 2024/05). Kun akkua alettiin ohjata muuttuvien hintojen mukaan, efektiivinen hinta oli 93 % keskimääräisestä spot-hinnasta (2024/06 – 2025/01). Efektiivisten hintatasojen ero oli 12 %. Näin ollen akun vaikutusta kustannuksiin voitiin arvioida kertomalla keskimääräiset vuotuiset sähkökustannukset suhteellisella hintaerolla. Keskimääräinen vuotuinen sähkökustannus (vain spot-markkinan kulut

huomioiden) vuosina 2021-2024 oli 7400 €. Ekstrapoloiden 7kk mittauksia koko vuodelle, älykkäämmällä akulla tapahtuvalla spot-ohjauksella näitä kustannuksia voitaisiin siten vähentää noin 900 € vuodessa. Tämä on vain 9 % FCR-N-markkinan kautta vuonna 2024 saaduista tuloista.



Kuva 6. Toteutuneiden spot-hintojen suhde kuukauden spot-keskihintaan. Akkujärjestelmän spot-ohjaus otettiin käyttöön 6/2024.

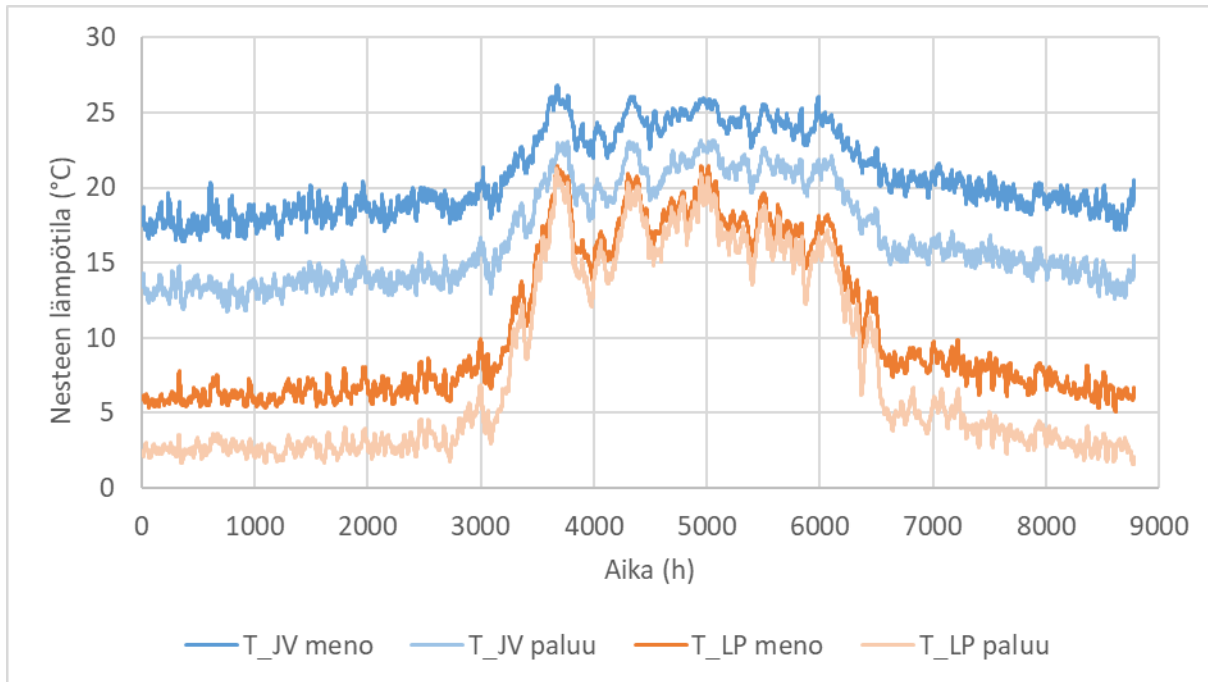
Toinen tapa arvioida akun vaikutusta on tarkastella akkuun varastoidun/akusta otetun energian kustannuksia. Tässä tapauksessa, kun akkua ei käytetty spot-hintaohjauksessa, otetun ja varastoidun energian arvon välillä oli itse asiassa 21 euron nettohäviö. Kun spot-hintaohjaus otettiin käyttöön, nettovoitto oli kuitenkin 168 €, ja hyödyntämisarvo oli 22 % korkeampi kuin varastointihinta. Silti, verrattuna FCR-N:n keskimääräisiin tuloihin, spot-markkinoiden keskimääräinen tuotto 7 kuukauden ajanjaksolla oli paljon pienempi. Toisaalta, akun ohjaaminen reservimarkkinan mukaan varmasti osaltaan vähensi spot-markkinan tuottopotentialia.

4.2. Jäteveden lämmöntalteenotto

Jäteveden lämmöntalteenotto lämpöpumpuilla oli asennettu kahteen rakennukseen. Järjestelmässä jätevesi kulkee lämmönvaihtimella varustetun varaajan läpi ja lämmittää siellä olevaa nestettä. Lämpöpumpun ke-ruupiiri kerää sitten lämpöä varaajasta lämpöpumpun käyttöön.

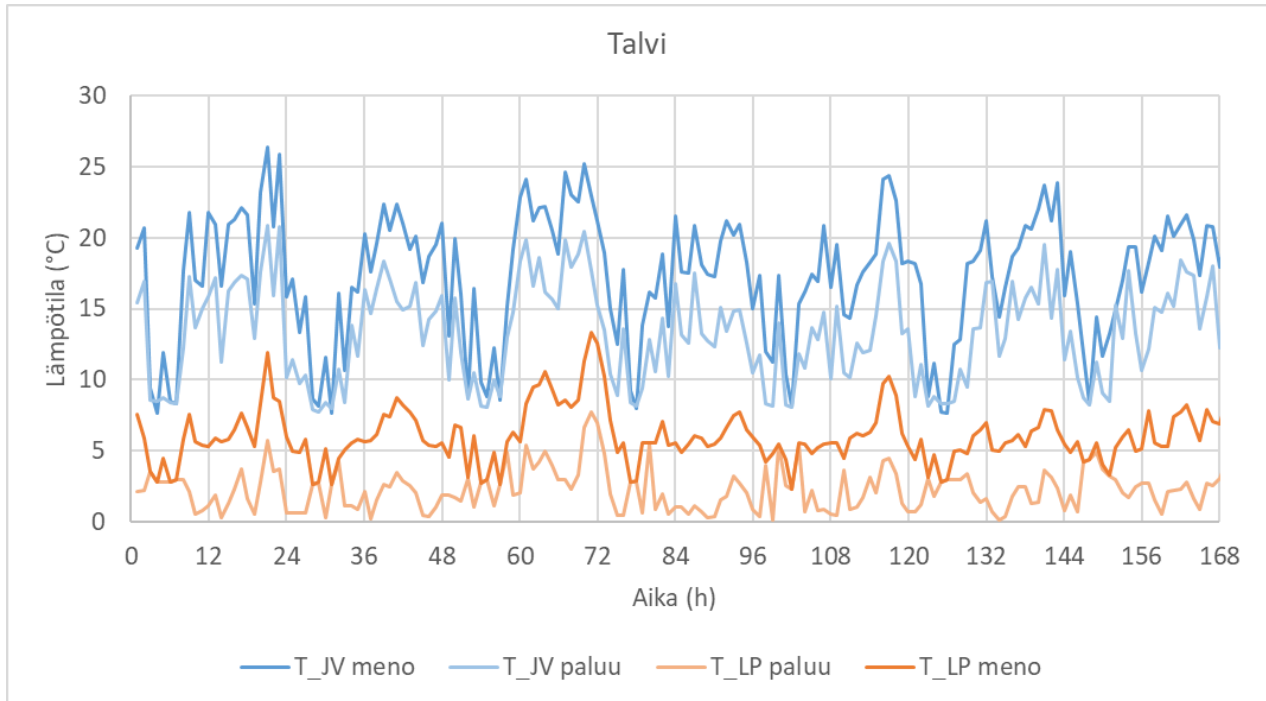
Molemmissa kohteissa etävalvomosta pystyi näkemään JV-LTO-järjestelmän reaaliaikaiset lämpötilatiedot. Kuitenkin vain toisessa järjestelmässä lämpötilatiedoista kerättiin historiatietoja, joita saattoi hyödyntää toiminnan arvioinnissa. Toisin kuin suunnitteluasiakirjoissa väitettiin, järjestelmän ja siihen liitetyn lämpöpumpun virtaus- ja energiamittauksia ei ollut saatavilla. Koska virtauksia LTO-järjestelmän molemmiin puolin ei tunnettu, ei talteenoton energiatehokkuutta voitu tarkasti arvioida. Etävalvomosta löytyi kuitenkin pitkän

aikavälin yhteenvedo lämpöpumpun energiataseesta. Kohteen jäteveden lämmöntalteenottomääräksi ilmoitettiin 336,89 MWh, kun taas sähkönkulutukseksi ilmoitettiin 61,758 MWh, jolloin COP oli 5,5. Jäteveden ja lämpöpumpun keräysnesteen lämpötilan vuorokausikeskiarvot on esitetty Kuva 7.

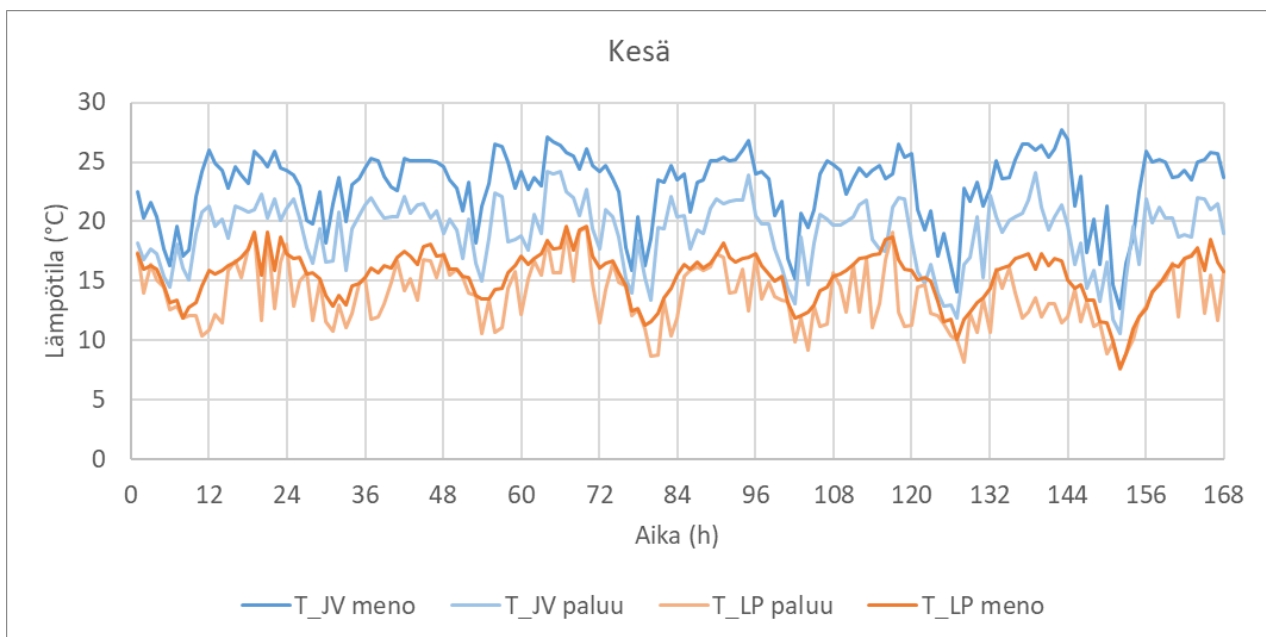


Kuva 7. Jäteveden ja lämpöpumpun keruupiirin lämpötilojen vuorokausikeskiarvot LTO-varaajan vaikutuksessa.

Tiedot lämpötilataseista on esitetty erikseen talvi- ja kesäkausilta tuntitasen kuvina (Kuva 8 ja Kuva 9) sekä tilastolukuina (Taulukko 2). Tiedoista nähdään, että kesäaikaan lämpöpumpun keruunesteen lämpötila on hyvin korkea, mikä parantaa lämmöntuotannon hyötysuhdetta. Jäteveden lämpötila nousee kesäaikaan pienemmän lämmitystarpeen myötä. Jäteveden loppulämpötila pysyy kuitenkin korkeana, ollen talviaikaankin keskimäärin 14 °C, jolloin jäähtymä on tyypillisesti alle 5 °C. Tämä kertoo, että jäteveden lämmöstä osa jää hyödyntämättä ja lämmönsiirron tehostamisella voitaisiin parantaa myös lämpöpumpun toimintaa.



Kuva 8. Jäteveden ja lämpöpumpun keruunesteiden tuntilämpötilat LTO-varaajan vaikutuksessa viikon aikana talvella.



Kuva 9. Jäteveden ja lämpöpumpun keruunesteiden tuntilämpötilat LTO-varaajan vaikutuksessa viikon aikana kesällä.

Taulukko 2. Jäteveden ja lämpöpumpun keruunesteen keskimääräiset lämpötilat LTO:n vaikutuksessa sekä LTO:n lämpötilahyötysuhteet jätevedelle ja keruunesteelle.

Vuodenaika	Lämpötilat ja lämpötilaerot (°C)						Hyötysuhde (%)	
	$T_{LP, meno}$	$T_{LP, paluu}$	ΔT_{LP}	$T_{JV, meno}$	$T_{JV, paluu}$	ΔT_{JV}	η_{JV}	η_{LP}
Talvi	6.8 ± 2.4	3.1 ± 1.9	3.7 ± 1.9	18.7 ± 4.4	14.1 ± 3.5	4.6 ± 1.9	29	23
Kesä	17.5 ± 2.6	16.3 ± 3.4	1.2 ± 1.6	24.3 ± 2.6	21.0 ± 2.5	3.3 ± 1.2	41	15

JV-LTO:n todellista kausihyötysuhdetta ei voida tarkasti määrittää ilman tietoa virtausmääristä ja energioista, mutta jäteveden ja lämpöpumpun keruupiirin lämpötilahyötysuhteita voidaan kuitenkin arvioida seuraavasti:

$$\eta_{LTO, JV} = \frac{T_{JV, meno} - T_{JV, paluu}}{T_{JV, meno} - T_{LP, paluu}}$$

$$\eta_{LTO, LP} = \frac{T_{LP, meno} - T_{LP, paluu}}{T_{JV, meno} - T_{LP, paluu}}.$$

Yhtälöissä verrataan siis yhden puolen toteutuneita lämpötilaeroja eri puolten suurimpaan lämpötilaeroon. Käyttäen Taulukko 2:n lämpötiloja, saadaan jäteveden talvi- ja kesäkauden LTO:n lämpötilahyötysuhteiksi 29% ja 41% sekä vastaavasti keruupiirin lämpötilahyötysuhteiksi 23% ja 15%. Jäteveden hyötysuhde on kesällä korkeampi, koska jäteveden lämpötilaerojen kausivaihtelu on keruupiirin kausivaihtelua pienempi. Keruupuolen hyötysuhdetta heikentää lämpöpumpun vähäisempi lämmöntarve. Talteenotetun lämmön määrää voisi kasvattaa esim. lataamalla hukkalämmöllä geoenergiakenttää.

4.3. Lämpöpumppujärjestelmät

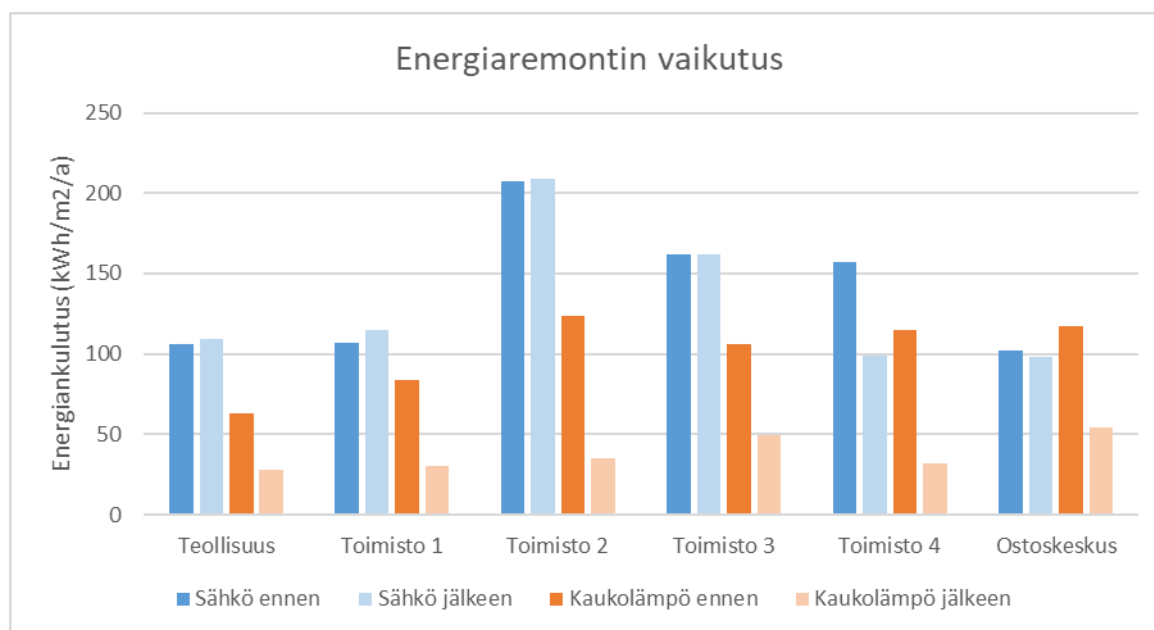
4.3.1. Lämpöpumppujen vaikutus energiankulutukseen

Lämpöpumppujärjestelmiä on toteutettu niin uudiskohteissa kuin olemassa olevien rakennusten energiaremonteissa. Joskus lämpöpumppujärjestelmä toteutetaan täysin itsenäisesti, kun taas toisissa hankkeissa niiden yhteydessä toteutetaan myös rakennuksen peruskorjausta ja muiden järjestelmien päivityksiä. Vaikka lämpöpumppu tyypillisesti tuottaa ja kuluttaa merkittävän osan rakennuksen energiasta, monissa kohteissa ei kuitenkaan toteuteta erillistä lämpöpumpun energiamittausta. Tällöin on vaikeampi määrittää lämpöpumpun energiatehokkuutta, erityisesti jos samaan aikaan on toteutettu muita päivityksiä.

Taulukko 3 näyttää esimerkkejä toteutetuista energiaremonteista ja niiden vaikutuksista suhteelliseen kaukolämmön ja sähkön kulutukseen. Kuva 10 näyttää energiankulutuksen tasot graafisesti. Vaikka kaikissa kohteissa pudotettiin kaukolämmön kulutusta 50 – 70%, ei sähkönkulutus kuitenkaan noussut merkittävästi. Eriyisesti kohteessa Toimisto 4 saatiin muiden energiaparannustoimenpiteiden myötä jopa laskettua sähkönkulutusta 37%, huolimatta lämpöpumpun tuomasta uudesta kulutuslähteestä. Vaikka järjestelmäkohtaisia mittauksia ei ollut saatavilla, tämä kertoo merkittävästä energiatehokkuuspotentiaalista palvelurakennuksissa.

Taulukko 3. Lämpöpumppujärjestelmän ja muiden energiatehokkuusparannuksien vaikutus rakennuksissa.

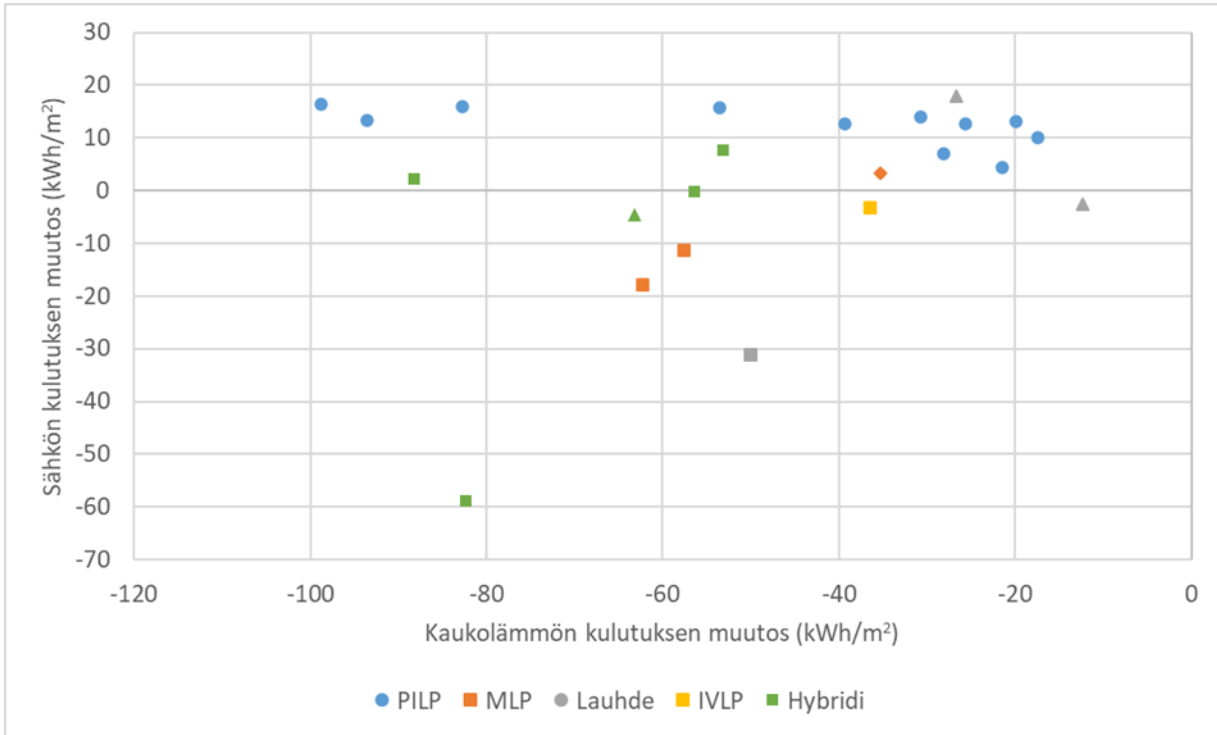
Kohde	Sijainti	Rak. vuosi (Rem. vuosi)	Lämpöpumppujen energianlähteet	Muut parannukset	KL muutos (%)	Sähkö muutos (%)
Teollisuus	Tampere	1960 (2005)	Maa	Merkittävä valojen LED-päivitys	-56.1	+3.0
Toimisto 1	Jyväskylä	2000 (2009)	Maa, poistoilma, jäähdytys	Pieni MLP-kapasiteetti	-63.5	+7.3
Toimisto 2	Jyväskylä	1999	Poistoilma, jäähdytys	Pieni valojen LED-päivitys	-71.5	+1.0
Toimisto 3	Jyväskylä	2000	Poistoilma, jäähdytys	Tarpeenmukainen ilmanvaihto	-53.2	-0.1
Toimisto 4	Helsinki	- (2020)	Maa, poistoilma, jäähdytys	Ilmanvaihtoremontti, lämmitysverkon tasapainotus, automaation säätö	-71.9	-37
Ostoskeskus	Tampere	- (2020)	Maa, poistoilma, jäähdytys	Ilmanvaihtopatterin uusiminen, LTO:n & lumensulatuksen muutokset	-53.7	-4.5



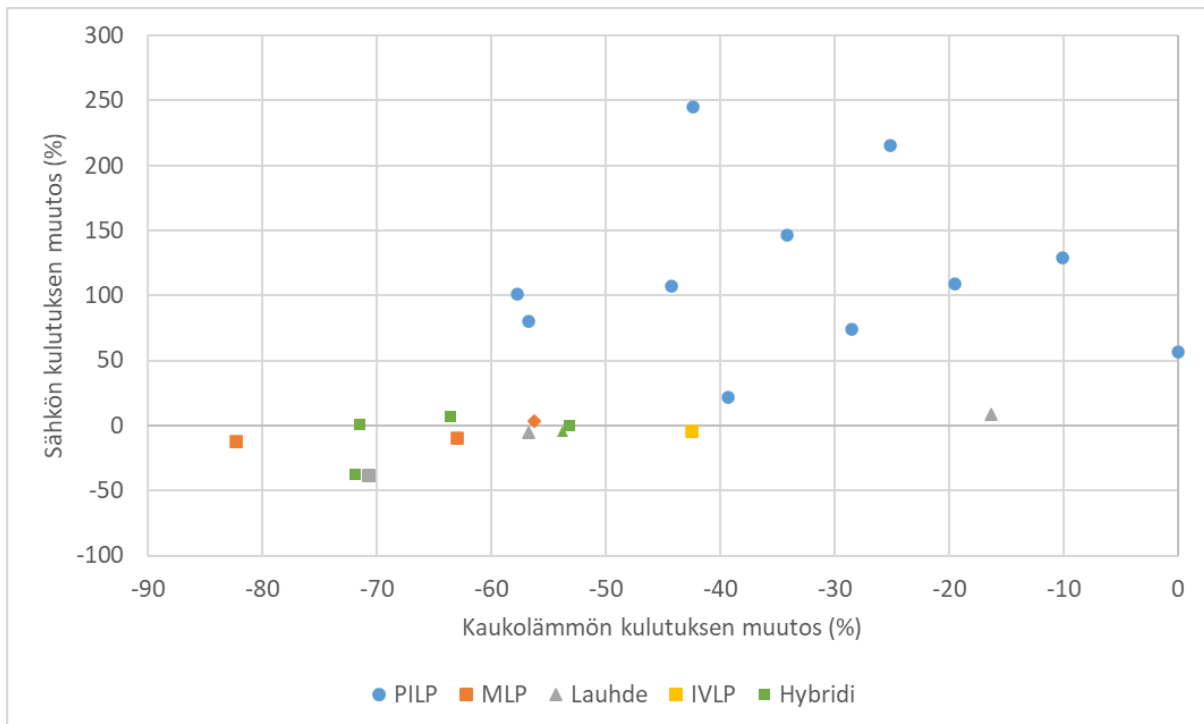
Kuva 10. Vuotuinen sähkön ja kaukolämmön kulutus ennen energiaremonttia ja sen jälkeen.

Kuva 11 näyttää laajemman otoksen kohteita, joissa lämpöpumpuilla on vähennetty kaukolämmön kulutusta. Poistoilmalämpöpumput olivat suosituimpia ratkaisuja asuinrakennuksissa. Kaukolämmön kulutus laski niissä 20 – 100 kWh/m², kun taas sähkön kulutus nousi 5 – 20 kWh/m². Toimitilarakennuksissa taas muut lämmönlähteet ja hybridiratkaisut olivat yleisiä. Kuva 12 näyttää samat muutoslukemat suhteessa alkuperäiseen

kulutukseen. Asuinrakennuksissa lämpöpumppu usein moninkertaistaa sähkönkulutuksen, koska sähkönkulutuksen lähtötaso on usein melko matala. Toimitiloissa muilla toimenpiteillä pystytään usein kompensoimaan lämpöpumpun tuomaa nousua, jolloin sähkönkulutus pysyy lähes alkuperäisellä tasolla.



Kuva 11. Kaukolämmön ja sähkön kulutuksen muutokset kaikissa saatavilla olleissa kohteissa. Värit ilmaisevat lämpöpumpun tyypin, muodot rakennuksen. Ympyrä: asuinrakennus, Neliö: toimistorakennus, Kolmio: Myymälärakennus, Timantti: Teollisuuskohde.



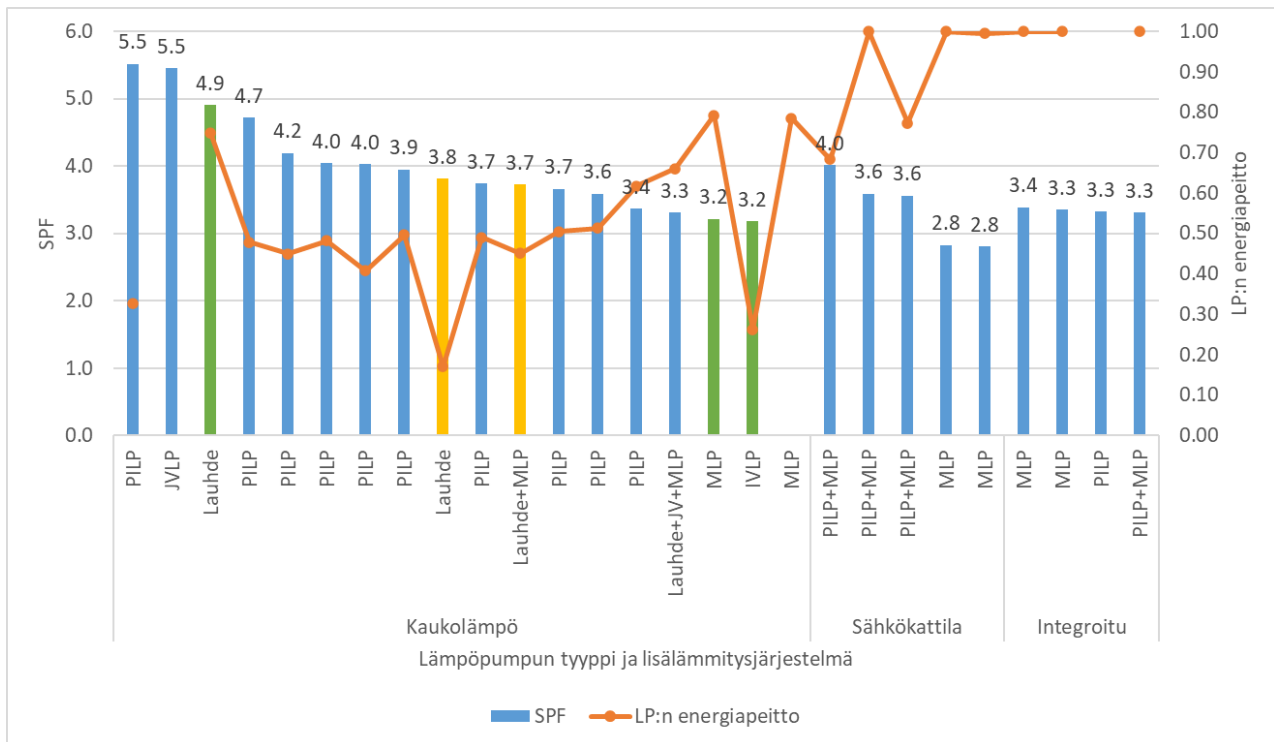
Kuva 12. Kaukolämmön ja sähkön kulutuksen suhteelliset muutokset kaikissa saatavilla olleissa kohteissa. Värät ilmaisevat lämpöpumpun tyyppin, muodot rakennuksen. Ympyrä: asuinrakennus, Neliö: toimistorakennus, Kolmio: Myymälä rakennus, Timantti: Teollisuuskohde.

4.3.2. Lämpöpumppujen energiatehokkuus

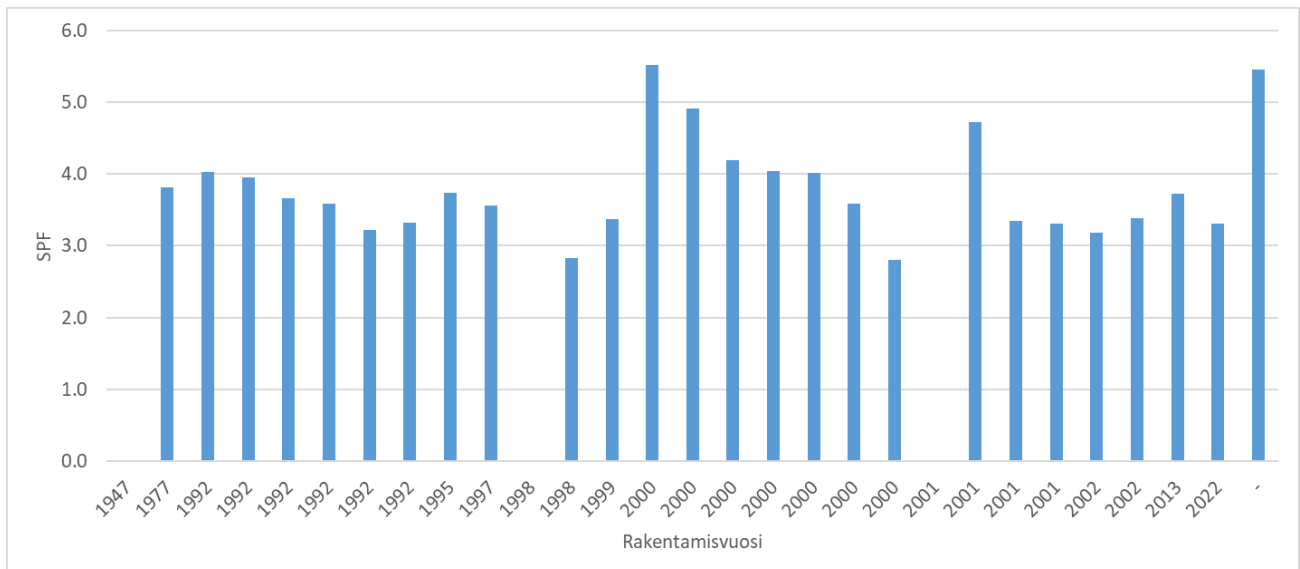
Lämpöpumput voivat käyttää monia eri lämmönlähteitä ja niiden mitoitusperiaatteet vaihtelevat. Kuva 13 esittää eri kohteissa toteutettujen lämpöpumppujärjestelmien SPF:n (Seasonal Performance Factor, keskimääräinen COP vuoden ajalta) ja energiatehokkuuden, niiltä osin kuin tiedot olivat saatavilla. Tulokset on jaoteltu sisälämmönlähteen mukaan ja jokaiseen tapaukseen on merkitty lämpöpumpun tyyppi lämmönlähteen mukaan (PILP=poistoilmalämpöpumppu, JVL=jätevesilämpöpumppu, MLP=maalämpöpumppu, Lauhde=kaupan kylmälaitteiden tai rakennuksen jäähdytyksen hukkalämpöä käyttävä lämpöpumppu). Ilma-vesilämpöpumppuja (IVLP) on toteutettu joissain kohteissa, mutta niistä ei ollut saatavilla käyttökelpoista dataa. Kiinteistöomistajien kokemukset olivat kuitenkin negatiivisia ja mm. jäätymisongelmien takia IVLP-järjestelmät eivät ole saavuttaneet odotettua energiatehokkuutta.

Kaukolämpö-lämpöpumppuhybrideissä lämpöpumpun energiatehokkuus vaihteli 20 – 80% välillä (Kuva 13). Sähkökattilaa varajärjestelmänä käyttävissä tapauksissa lämpöpumpun energiatehokkuus oli tyypillisesti korkeampi eikä monissa tapauksissa sähköistä sisälämmitystä käytetty juuri lainkaan.

Lämpöpumppujärjestelmien SPF-lukemat vaihtelivat välillä 2.8 – 5.5. PILP-järjestelmien lämpökertoimet olivat yleensä korkeampia kuin MLP-järjestelmien. Lähtöoletuksena oli, että uudemmissa kohteissa tyypillisesti käytettävät matalammat lämpötilatasot voisivat lisätä niissä käytettävien lämpöpumppujen energiatehokkuutta. Suurin osa rakennuksista oli kuitenkin rakennettu samojen rakentamismääräysten aikana ennen vuotta 2003 eikä rakennuksen iän vaikutusta SPF-arvoon voitu osoittaa (Kuva 14).



Kuva 13. Lämpöpumppujärjestelmien keskimääräinen toteutunut SPF ja lämpöpumpun energiapitoaste. Rakennustyyppi on merkitty palkin värillä, *sininen: asuinrakennus*, *vihreä: toimistorakennus*, *keltainen: myymälä* *rakennus*.



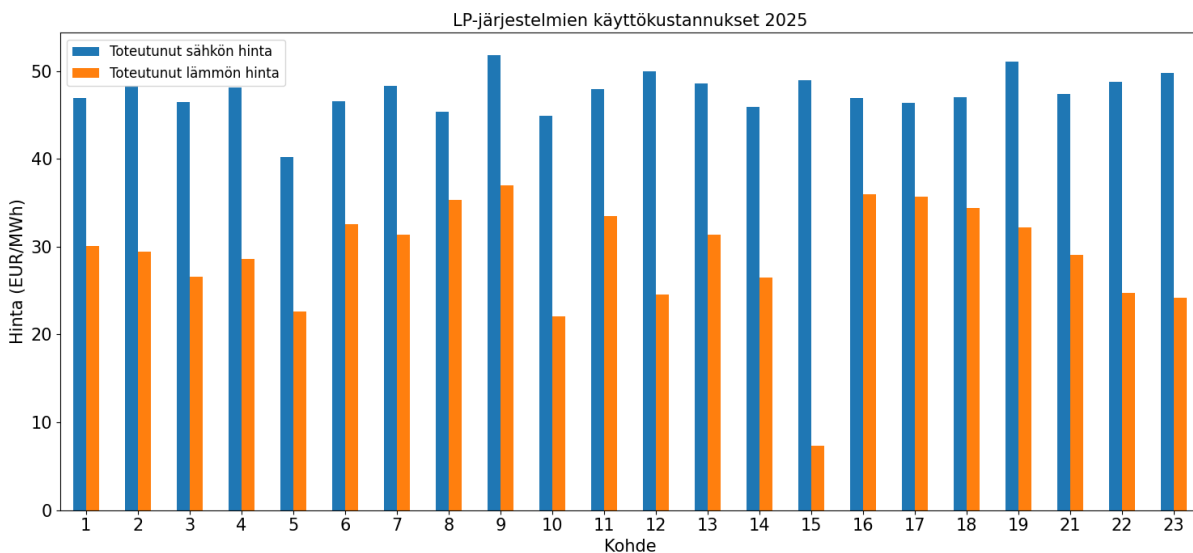
Kuva 14. Lämpöpumppujen SPF-arvot kohteiden rakentamisvuosien mukaan.

4.3.3. Lämpöpumppujen käyttökustannukset

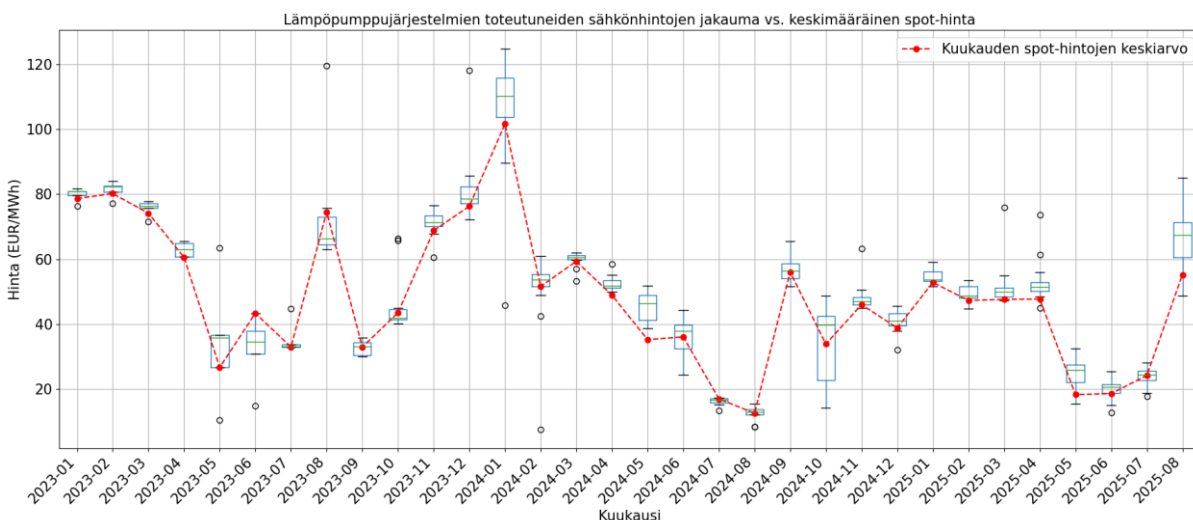
Lämpöpumppujen käyttökustannuksia voi arvioida esim. sen kuluttaman sähkön hinnan mukaan tai tuotetun lämmön hinnan mukaan. Kuva 15 näyttää toteutuneet hinnat eri lämpöpumppukohteille vuoden 2025 tammi-elokuun ajalta, laskettuna tuntikohtaisten kulutusten ja sähkön hinnan mukaan. Tuotetun lämmön hintaan laskettiin mukaan sähkön spot-hinta, siirtohintaa sekä sähkövero. Sähkön hintatoteumassa

huomioidaan vain spot-hinta. Verrattuna aikavälin keskimääräiseen spot-hintaan, sähkön toteutunut kustannus oli 3 – 29% suurempi. Kaikissa kohteissa keskimäärin sähkön spot-hinnoista laskettu kustannustaso oli 17% spot-hintojen vuosikeskiarvoa korkeampi. Lähtökohtaisesti kohteissa ei ollut käytössä spot-sähkösopimusta, mutta tämä kertoo kuitenkin potentiaalista leikata käyttökustannuksia ajoittamalla kulutusta eri tavalla. Vuodesta 2021 lähtien, keskimääräinen hintasuhte oli +14%, joskaan kaikista kohteista ei ole dataa näin pitkältä ajalta.

Lämpöpumpuille laskettiin myös tuotetun lämmön kustannus, jossa huomioitiin kulutetun sähkön kustannuksena spot-hintojen lisäksi siirtomaksut ja sähkövero (Kuva 15). Näin saatiin vuoden 2025 (tammi-elokuu) toteutuneeksi kustannukseksi 30 €/MWh (ilman Kohdetta 15, jossa kulutusdata oli erityisen puutteellista). Kuva näyttää myös toteutuneen spot-sähkön hinnan (



Kuva 15. Eri lämpöpumpppukohteissa toteutunut sähkön ja lämmön hinta vuonna 2025. Sähkö hinta sisältää vain energiaosuuden, kun taas lämmön hinnassa on huomioitu myös siirtomaksu ja sähkövero.



Kuva 16. Lämpöpumpputjärjestelmien keskimääräinen sähkön kustannus, laskettuna tuntitason kulutus- ja hintatiedoista.

Vuositason hintasuhteiden vertailu ei huomioi sitä, että kulutus painottuu yleensä kalliimmille talvikauden tunneille. Kuva 16 näyttää kuukausitasolla toteutuneiden hintojen vaihteluvälit (box plot) keskimääräisten spot-hintojen rinnalla. Nähdään, että keskimäärin kohteiden toteutuneet hinnat ovat hieman spot-keskiarvoa korkeampia, mutta ajoittain jäädään myös sen alapuolelle. Palloilla merkityt poikkeavat arvot johtuvat todennäköisimmin joidenkin kohteiden puutteellisesta datasta, joka vääristää kulutusjakaumaa.

4.3.4. Hybridilämpöpumppujärjestelmät

Hybridilämpöpumppujärjestelmät hyödyntävät lämpöpumpuissa useita eri lämmönlähteitä. Seuraavat tapaukset näyttävät tarkemmin kuinka eri lämmönlähteet voivat tuottaa energiaa.

4.3.4.1. Vanha asuinrakennus, Tampere

Rakennuksessa toteutettiin useassa vaiheessa perusteellinen energiaremontti, jossa paranneltiin sekä rakennuksen vaippaa että sen lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmiä. Rakennukseen asennettiin energiaremontissa myös lämpöpumppu- ja aurinkoenergiajärjestelmiä. Rakennuksen kaukolämpöliittymä säilytettiin myös energiaremontin jälkeen, mutta kaukolämmön kulutus laski merkittävästi.

Taulukko 4 näyttää taloyhtiöön asennettujen järjestelmien raportoidut kapasiteetit ja vuotuisen energiantuotannon. Näiden lisäksi toteutettiin päivityksiä lämmönjakeluun, vaipan lämmöneristykseen ja ikkunoihin sekä asennettiin vedenvirtauksen rajoittimia ja LED-valaisimia. Energiaremontissa hyödynnettiin EU-tukia, joita ilman kaikki toimenpiteet eivät olisi olleet kannattavia.

Muista tämän luvun kohteista poiketen, nämä tiedot perustuvat taloyhtiön itse julkaisemiin karkeisiin koosteisiin, mutta osoittavat kuitenkin eri lämmönlähteiden potentiaalia. Merkittävin lämmönlähde oli ilmanvaihdon poistoilma, kun taas jätevedestä kerättiin vain murto-osa tästä. Ei kuitenkaan ole tietoa kuinka eri lämmönlähteet vaikuttivat toisiinsa tai mikä oli niiden käyttöprioriteetti. Aurinkoenergian tuotanto oli pientä verrattuna lämpöpumppujärjestelmiin.

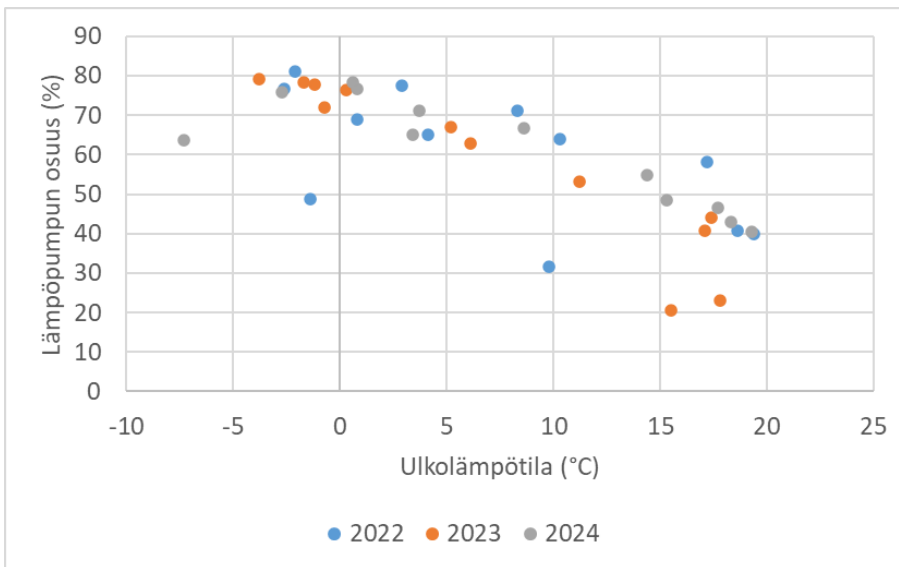
Taulukko 4. Tamperelaisen asuinkerrostalon energiajärjestelmien vuotuiset tuotantomäärät.

Uusiutuvan energian lähde	Kapasiteetti	Energiantuotanto (MWh/vuosi)
Maalämpö, maaviileä	Energiakaivot 5 x 300m	140
Poistoilma	60 kW	270
Jätevesi	-	50
Aurinkosähkö	21 kW	18
Aurinkolämpö	10 m ²	7

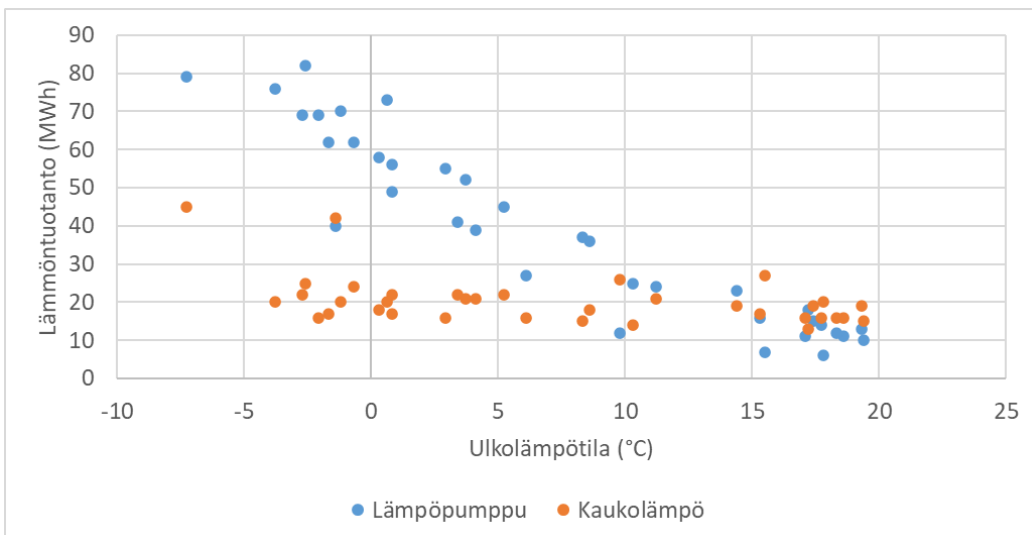
4.3.4.2. Uusi asuinrakennus, Helsinki

Tässä rakennuksessa toteutettiin energiaratkaisuna kaukolämpö + hybridilämpöpumppu. Lämpöpumpussa hyödynnetään neljää eri lämmönlähdettä: kaupan kylmäkoneiden lauhde, tilojen jäähdytyksen hukkalämpö, jäteveden lämpö ja maalämpö.

Kuva 17 näyttää lämpöpumpputjärjestelmän kuukausitason energiapeiton ulkolämpötilan funktiona. Lämpöpumpun osuus kasvaa lämpötilan laskiessa, kun taas kaukolämpö tuottaa melko tasaista perustehoa ympäri vuoden. Kylmimpinä aikoina kaukolämpö voi kuitenkin myös auttaa kattamaan huippukulutusta (Kuva 18). Kuvasta nähdään, että lämpöpumpun osuus on ajoittain ollut poikkeuksellisen pientä. Järjestelmän ylläpitäjät raportoivatkin, että monimutkainen järjestelmä on vaatinut vuosien virityksen, jotta on päästy tasaisempaan, optimaaliseen käyttötapaan.



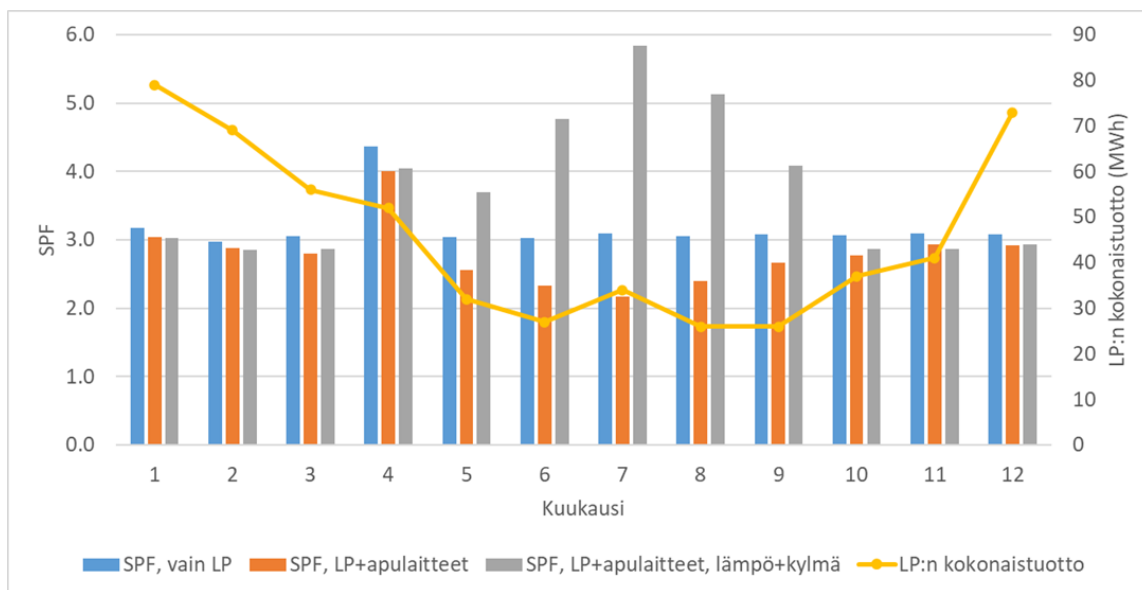
Kuva 17. Lämpöpumpun kuukausittainen energiapeitto ulkolämpötilan funktiona.



Kuva 18. Kuukausittainen lämmöntuotanto kaukolämmöllä ja lämpöpumpulla eri ulkolämpötiloissa.

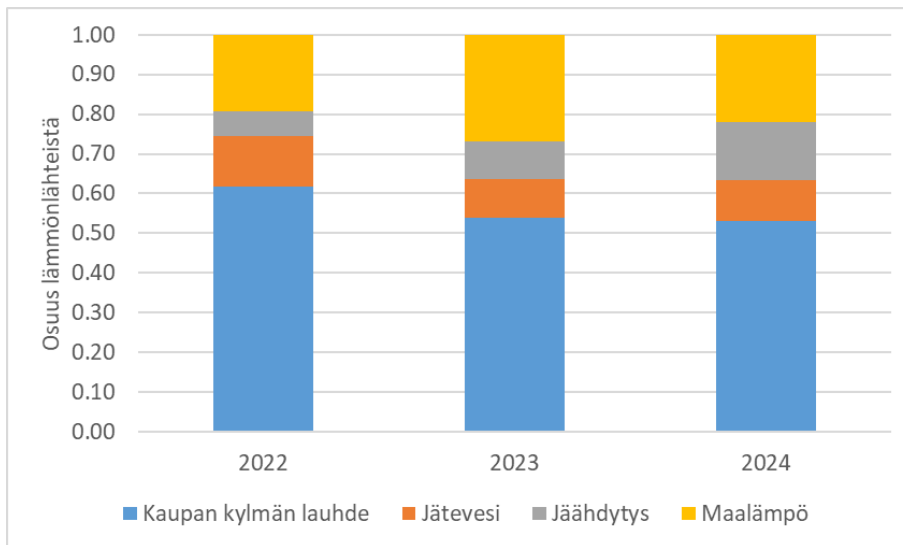
Rakennuksen lämpöpumpputjärjestelmää käytetään sekä lämmön että kylmän tuotantoon. Järjestelmästä raportoitiin myös erikseen lämpöpumpun kompressorin ja apulaitteiden (pumppujen) sähkönkulutus. Kuva 19 näyttää lämpöpumpun kausilämpökertoimen (SPF) laskettuna eri taserajoilla. Mikäli huomioidaan vain lämpöpumpun itsensä käyttämä sähkö, saadaan vuotuiseksi lämpökertoimeksi 3.16, kun taas huomioimalla

myös apulaitteiden sähkö, lämpökerroin laskee arvoon 2.90. Jos lasketaan mukaan myös jäähdytysenergia, saadaan lämpökertoimiksi vastaavasti 3.61 ja 3.31. Ilman apulaitteita SPF on siis noin 9% korkeampi. Kuvasta nähdään kuitenkin, että taserajojen vaikutus on suurempi kesäajan matalamman kulutuksen aikana. Tällöin pumppauksen kulutuksen osuus suhteessa suurempi kuin lämmityskaudella. Heinäkuussa apulaitteiden huomiointi laskee lämpökerrointa 30%, kun taas jäähdytyksen huomioiminen nostaa lämpökerrointa tästä 170%. Lämpöpumpun energiatehokkuuksia vertaillessa on siis tärkeää tietää mitä osa-alueita laskelmassa huomioidaan.

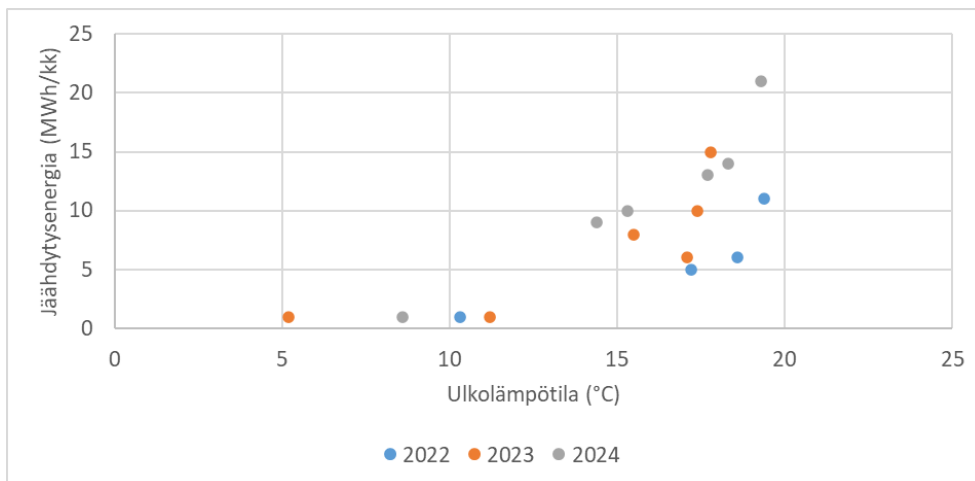


Kuva 19. Yhteistuotantolämpöpumpun lämpökertoimet eri tavoin laskettuna.

Rakennuksessa kerätään lämpöä neljästä eri lämmönlähteestä. Merkittävin lämmönlähde on kaupan jäähdytyslaitteista saatava lauhdelämpö, 53 – 62% kerätystä lämmöstä. Jäteveden lämpö on 10 – 13% lämmöstä, jäähdytys 6 – 15% ja maalämpö 19 – 27%. Järjestelmän virityksen myötä jäähdytyksen tuotanto on kasvanut (Kuva 21) ja samalla myös jäähdytyksen hukkalämmön osuus kerätystä lämmöstä.

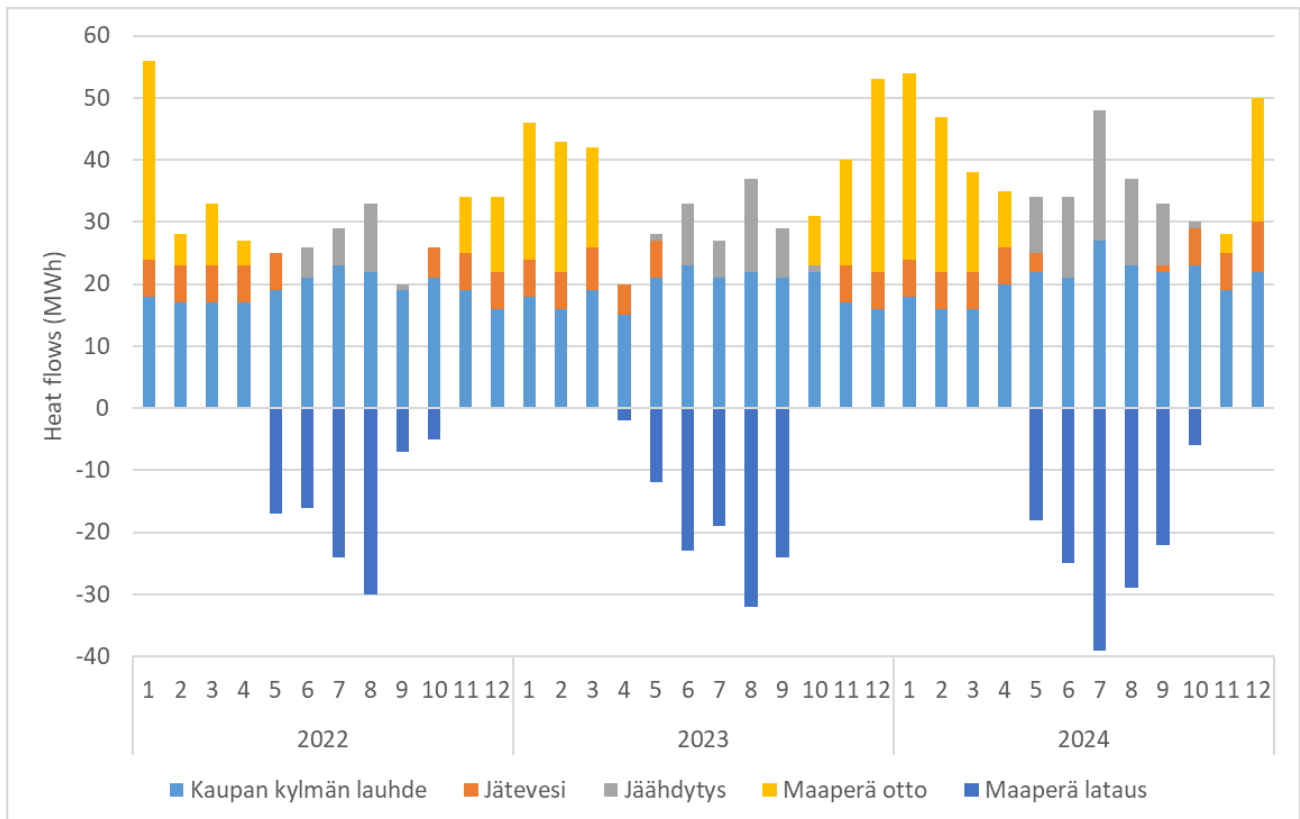


Kuva 20. Lämmönlähteiden osuus hybridilämpöpumpputjärjestelmässä.



Kuva 21. Jäähdytysenergian tuotanto hybridienergiajärjestelmässä.

Kaikkea kerättyä lämpöä ei kuitenkaan hyödynnetä suoraan lämpöpumpussa, vaan 1/3 siitä varastoidaan rakennuksen geoenergiakenttään (16 energiakaivoa), kun hukkalämmön määrä ylittää välittömän tarpeen. Kuva 22 näyttää kuukausitasolla miten paljon lämpöä kerätään eri lähteistä eri vuodenaikoina. Kaupan lauhdelämpöä kerätään suuret määrät kaikki kuukausina. Jäteveden kerääminen keskittyy lämmityskaudelle, kun taas kesäkaudella sen sijaan kerätään jäähdytysenergian hukkalämpöä. Maalämpöä lämpöä kerätään vain lämmityskaudella, kun taas kesäaikaan energiakaivoihin vain varastoidaan energiaa. Tyypillisesti energiakentän lataamisella voidaan ehkäistä sen ennenaikaista jäähtymistä ja taata lämpöpumpputjärjestelmän tehokas toiminta pitkällä aikavälillä. Tässä tapauksessa energiakenttään ladataan enemmän lämpöä kuin sieltä otetaan. Kolmen toimintavuoden keskiarvo oli 21% enemmän latausta kuin purkua, mutta kolmantena vuotena latausta oli 35% enemmän. Tämä voi vähitellen nostaa energiakentän lämpötilaa. Korkeampi lämpötila on hyvä lämmityskäytössä, mutta koska energiakenttää käytetään myös jäähdytykseen, voi lämpötilan nousu vähitellen heikentää sen jäähdytyspotentiaalia. Onkin tärkeää seurata energiakentästä saatavan nesteen lämpötilaa, jotta voidaan välttyä sekä ylikuumenemiselta että liialta energiankeruulta.



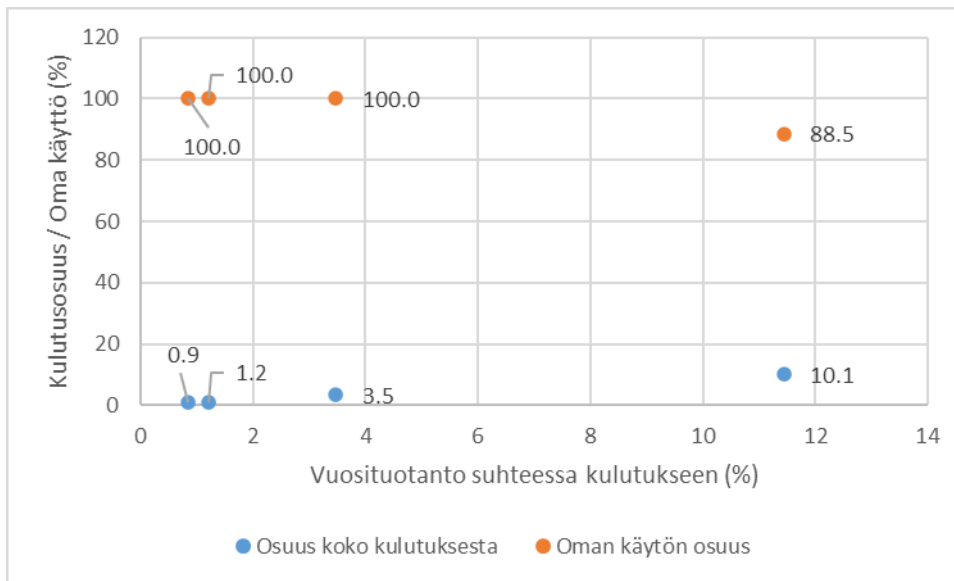
Kuva 22. Lämmönlähteiden hyödyntämisen ajallinen jakauma.

4.4 Aurinkoenergiajärjestelmät

Aurinkolämpöjärjestelmiä ei juuri toteuteta suurissa kiinteistöissä Suomessa. Ainoassa löydettyssä kohteessa järjestelmän mittausdataa ei ollut saatavilla. Aurinkosähköjärjestelmät ovat kuitenkin yleisiä. Niiden energiantuotanto vastaa lähtökohtaisesti suunnitelmia eikä siinä ole ongelmaa.

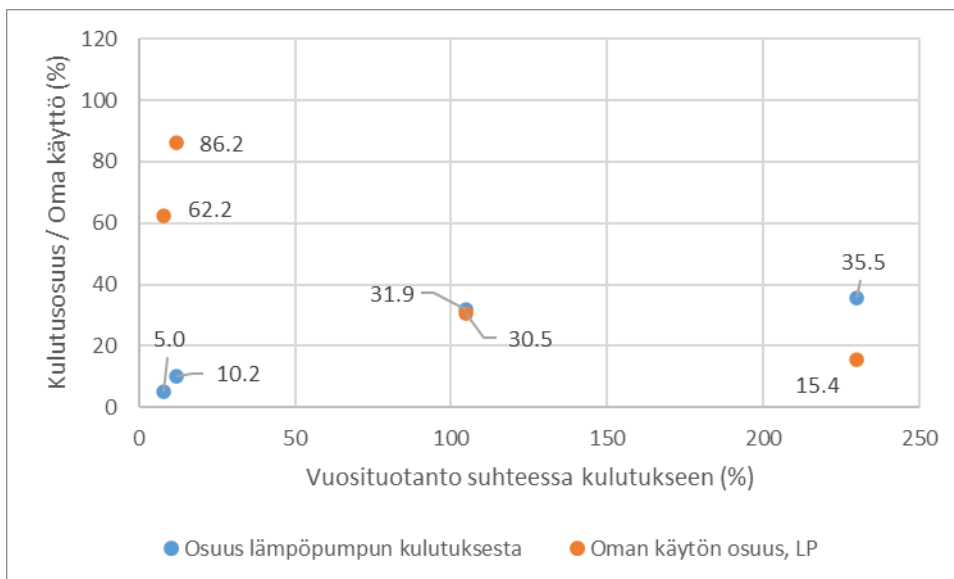
Aurinkosähkön arvon maksimoimiseksi on kuitenkin oleellista hyödyntää mahdollisimman suuri osa tuotannosta suoraan omaan kulutukseen, koska tällöin tuotannolla voi kattaa energiamaksujen lisäksi ostoenergiaa koskevia siirtomaksuja, sähkövero ja arvonlisävero. Ylijäämäenergian myynnissä hyöty on vain energiamaksun verran. Tätä voidaan huomioida tarkastelemalla itse tuotetun energian oman käytön osuutta. Tyyppillisesti oman käytön osuus pienenee samalla, kun kulutuksesta katettu osuus kasvaa.

Tarkastelluissa suuremmissa kiinteistöissä aurinkosähköjärjestelmät oli mitoitettu pieniksi verrattuna kokonaiskulutukseen, jolloin tuotettu aurinkosähkö käytettiin pääosin kiinteistön omaan kulutukseen (Kuva 23). Itse tuotetun energian oman käytön osuus oli 100% kolmessa kohteessa neljästä. Näissä tapauksissa omaa kulutusta saatiin katettu vain 1 – 3%. Kun omaa kulutusta katettiin jopa 10%, niin oman käytön osuuskin laski alle 90%.



Kuva 23. Aurinkosähkön käyttö kokonaiskulutuksessa.

Aurinkosähkijärjestelmillä voidaan pyrkiä kattamaan lämpöpumppujen luomaa korkeampaa sähköenergian kulutusta. Aurinkosähkön vuodenaikojen mukainen tuotantoprofiili on kuitenkin vastakkainen lämpöpumppujen kulutuksen kanssa eli kulutus on pienimmillään tuotannon huippuaikoina. Kuva 24 näyttää tietoa aurinkosähkön hyödyntämisestä pelkästään lämpöpumpun kulutukseen. Vaikka yhdessä kohteessa kokonaistuotanto oli yli kaksinkertainen kulutukseen verrattuna, voitiin sillä kattaa vain 36% lämpöpumpun energiantarpeesta ja tällöin oma käytön osuudeksi jäi 15%. Kohteessa, jossa tuotantosuhde oli 105%, lämpöpumpun kulutustietoa oli saatavilla vain maalies-lokuun ajalta, minkä takia kulutuksen kattavuus oli suurta.

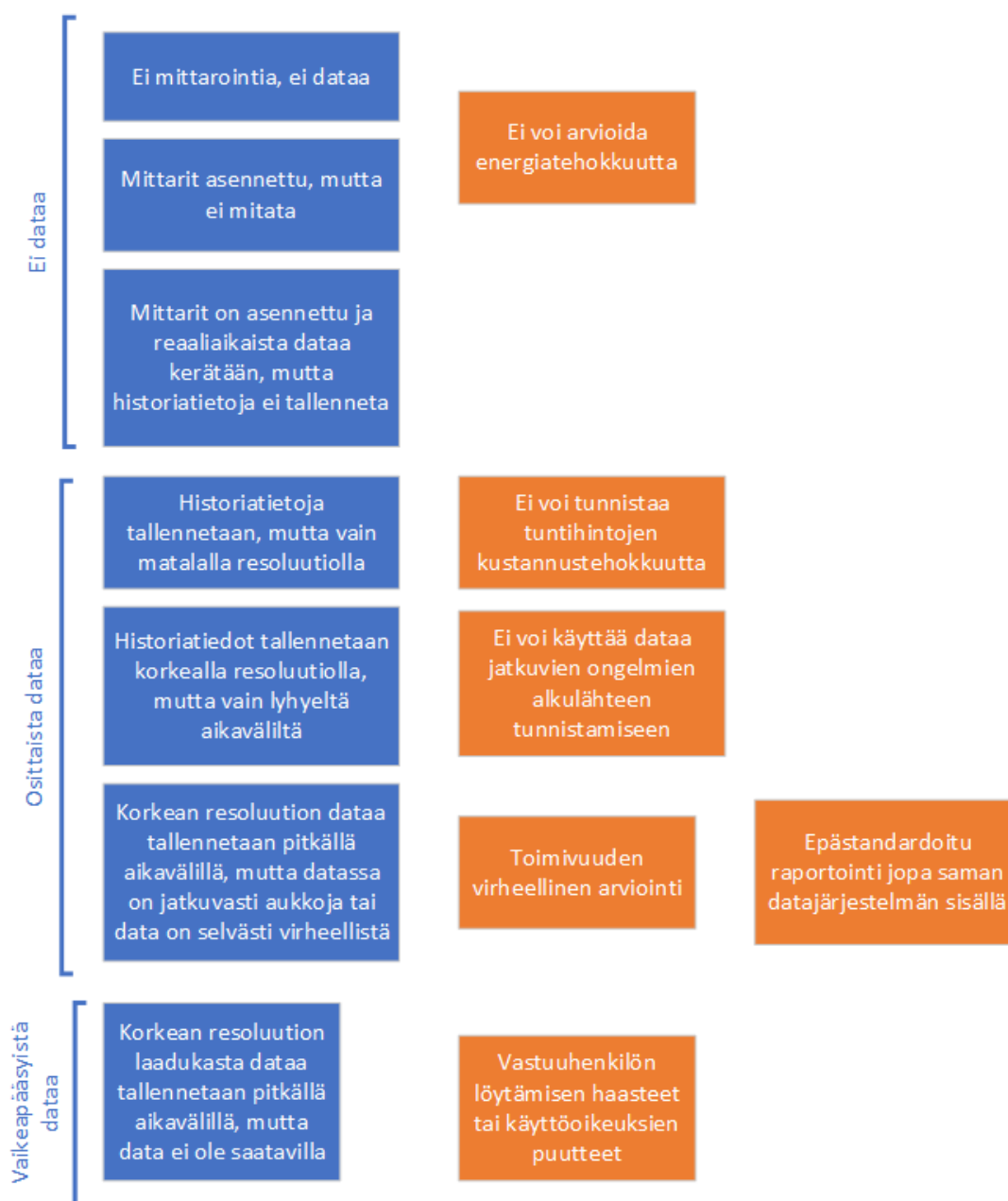


Kuva 24. Aurinkosähkön käyttö lämpöpumpun kulutuksessa.

5. DATAAN LIITTYVÄT HAASTEET JA SUOSITUKSET

5.1. Datan haasteet

Datan kerääminen tutkimusta varten ei ollut mutkatonta. Vaikka rakennusten energiaremontit ovat yhä yleisempiä, dataa niiden vaikutusten arvioimiseksi ei usein ole saatavilla. Saatavuusongelmalla on useita tasoja, kuten Kuva 25 näyttää.



Kuva 25. Yhteenveto energiadatan ongelmista.

5.1.1. Datan puuttuminen

Hybridiennergiajärjestelmiä suunnittelevat konsulttiyhtiöt toteuttavat hyvin yksityiskohtaisia simulaatiotutkimuksia ja asettavat tavoitteita rakennusten ja niiden järjestelmien energiankulutukselle. Kuitenkin useimmissa tapauksissa suunnittelutoimistot eivät ole enää mukana projektissa urakan valmistuttua eivätkä siten saa käsiinsä dataa siitä, miten suunnitellut järjestelmät toimivat käytännössä.

5.1.2. Ei-standardimuotoinen data

Julkinen tietokanta energiaremonttihankeiden tietojen julkaisemiseksi voisi tarjota mahdollisuuden vertailla hankkeita, tunnistaa hyviä ratkaisuja ja rohkaista potentiaaliset remontoijat toteuttamaan uusia järjestelmiä. Yksi tällainen tietokanta on Energiahankkeet.fi, johon on mahdollista lisätä yksittäisten hankkeiden tietoja. Tietokannassa on yhtenäiset pääkategoriat sisällytettävälle tiedolle, mutta toimitetun tiedon laatu on vaihtelevaa. Useimmat järjestelmäkuvaukset ovat kvalitatiivisia, näyttäen asennetun järjestelmän tyyppin (MLP, PILP, aurinkopaneelit jne.), mutta ei ole tietoa järjestelmien kapasiteetista tai siitä kuinka paljon energiaa ne tuottavat. Useimmat listatut hankkeet eivät sisällä tietoa rakennuksen energiankulutuksesta ennen tai jälkeen energiaremontin. Vaikutusarviot taas annetaan välillä energiana, välillä päästöleikkauksina ja joskus energialaskujen muutoksena. Jotkut arvot annetaan absoluuttisina lukuina ja toiset prosentteina. Vaihtelevat esitystavat tekevät järjestelmien vertailun haastavaksi. Energiajärjestelmien tuntidataa analysoidessa ei aina ollut selvää sisältääkö lämpöpumpun kulutus myös mahdollisen integroidun sähkölämmittimen energian.

5.1.3. Osittainen ja vaikeasti saatavilla oleva data

Julkisesta tietokannasta löytyi kiinnostavia hankkeita, joista muutamaan löydettiin yhteystieto. Eräs taloyhtiö oli perustanut järjestelmänsä yhteyteen erillisen lämpöyhtiön, ja he suostuivat nopeasti toimittamaan dataa hybridiennergiajärjestelmästä, jota operoi toinen yritys. Useiden yhteydenottojen jälkeen operaattori vastasi, että järjestelmän kanssa on paljon ongelmia eikä data siten näyttäisi oikealla tavalla toimivan järjestelmän tietoa. Erityisen huolestuttavaa oli, että operaattori kertoi järjestelmän historiatietojen keräämisen olevan hyvin työlästä ja aikaa vievää. Tämä kertoo tarpeesta systematisoida ja automatisoida energiajärjestelmien tiedonkeruuta, jotta analyysin vaadittava data tulee helposti saataville.

Eräs kiinteistöomistaja suostui toimittamaan dataa jäteveden LTO-järjestelmistään. Rakennusautomaatiojärjestelmä oli kytketty pilvipohjaiseen etävalvomoon, jonka käyttöliittymän kautta oli helppo päästä käsiksi historiatietoihin. Yhden järjestelmän etävalvomosta löytyi mittauspisteet LTO-järjestelmän oleellisille lämpötiloille. Kävi kuitenkin ilmi, että vaikka rakennuksen muita lämpötilatietoja tallennettiin tietokantaan, LTO-järjestelmästä ei kerätty historiatietoja, vaan raportoitiin ainoastaan reaaliaikainen tieto senhetkisestä tilanteesta. Ilman historiatietoja kohteen energiajärjestelmää ei voitu analysoida.

Toisen järjestelmän tapauksessa historiatietoja kerättiin lämpötiloista, mutta virtaus- tai energiamittauksia ei ollut mukana. Järjestelmään kytketty lämpöpumppu ei ollut osana samaa monitorointijärjestelmää eikä sen historiatietoja ollut saatavilla. Näin ollen LTO:n ja lämpöpumppujärjestelmän energiatehokkuutta ei voitu määrittää. Kiinteistön omistaja, suunnittelija tai etävalvoja eivät tienneet puuttuvista tiedoista, mutta suunnitteludokumenteissa kyllä mainittiin, että ne olisi kuulunut kytkeä erillisen rajapinnan kautta yhteiseen järjestelmään. Järjestelmän urakoitsija saatiin lopulta kiinni, mutta heillä ei ollut ylläpitösopimusta järjestelmään. Heillä oli pääsy kaikkeen järjestelmän dataan, mutta sen toimintaa ei seurattu. Yrityksestä todettiin,

että yhden järjestelmän datan kerääminen, puhdistaminen ja tarkistaminen jatkoanalyysiä varten vaatisi asiantuntijalta kaksi kokonaista työpäivää.

Mittaustiedoissa on usein katkoja, joista data puuttuu kokonaan. Tällaiset katkot voivat olla kestoiltaan tunteja, päiviä, viikkoja tai pahimmassa tapauksessa kuukausia. Tähän liittyvä haaste on pitkään jatkuva virheelisten mittausten jakso, jossa kerätty data ei mitenkään voi kuvata järjestelmän todellista toimintaa. Tyypillinen ongelma on myös se, että mittauksen häiriö johtaa usean tunnin nollatulokseen, jota seuraa yksi erittäin suuri piikkiarvo, mikä vääristää mittaustuloksia useaan suuntaan. Tästä voidaan päätellä ylläpitoprosessin kehitystarpeita. Katkot ja vähintäänkin räikeät virhearvot pitäisi tunnistaa nopeasti ja järjestää tarvittava huoltotoimenpide, jotta mittausdatan laatu ja saatavuus ei kärsisi pitkäaikaisesti.

Datan esikäsittelytekniikoiden kirjallisuuskatsaus (Fan et al., 2021) esittelee datan puhdistuksen ja korjaamisen perusperiaatteita ja erilaisia ratkaisuehdotuksia, joita tieteellisessä kirjallisuudessa on kehitetty. Datankäsittelyn tehtäviä ovat mm. puuttuvien arvojen lisääminen, poikkeavien arvojen tunnistaminen ja datan skaalaus. Datan esikäsittely on tyypillisesti yrityksen ja erehdyksen kautta toimivaa manuaalista työtä. Lisää kehitystyötä tarvitaankin datan esikäsittelyn automatisointiin.

(Choi et al., 2024) esittää menetelmiä poistaa päällekkäisiä tietoja eri lähteistä kerätystä datasta hyödyntäen eri energialajien mittauksia. (Takahashi et al., 2021) taas esittää koneoppimisen käyttöä poikkeavien arvojen tunnistamisessa ja puuttuvien arvojen syöttämisessä. Käsiteltyjä poikkeamia olivat yksittäiset puuttuvat arvot, puuttuvien arvojen yhdistyminen suureksi lukemaksi seuraavaan onnistuneeseen mittaukseen sekä pitkäkestoiset mittauskatkot. Menetelmä vaikuttaa lupaavalta, joskin sillä voi olla haasteita lämpökuormien kanssa, johtuen suuremmasta vaihtelusta.

5.1.4. Datan resoluutio ja varastointiongelmat

Eräs kiinteistösijoitusyhtiö oli toteuttanut monia rakennusten energiaremontteja. Dataa ei kuitenkaan tallennettu korkealla resoluutiolla. Tuntitason tai sitä korkeamman resoluution data säilytettiin vain kaksi viikkoa ennen sen pysyvää poistamista. Vuorokausitason dataa kerättiin kuitenkin pidemmältä aikaväliltä.

Eräessä palvelurakennuksessa oli käytössä lämpöpumppu ja aurinkolämpökeräimet. Kummassakaan järjestelmässä ei kuitenkaan ollut omaa sähkömittarointia, joten energiatehokkuuden määrittäminen oli hankalaa. Ylläpitohenkilöstö myös itse yllättyi dataa tutkittaessa, että järjestelmien historiatiedot ulottuivat vain viiden kuukauden päähän. Syyksi osoittautui tietokannan vakioarvoinen kokorajoitus pilvipalvelun toimittajan puolelta, mikä pakotti vanhan datan automaattisen poistamiseen. Ongelmaa pahensi se, että osa datasta kerättiin tarpeettoman korkealla resoluutiolla, mikä kiihdytti tietokannan ennenaikaista täyttymistä.

5.1.5. Tietoturvallisuus

Eräällä kiinteistöomistajalla oli haasteita toimittaa järjestelmiensä toimintadataa johtuen voimistetuista turvajärjestelyistä. Teknisen tiedon jakaminen ja vierailut kohteisiin vaativat taustojen turvatarkastuksen, mikä voi viedä 2 – 6 kuukautta aikaa. Toisaalta datan omistussuhteiden epäselvyys voi myös estää olemassa olevan datan käyttämisen. Julkisista tietokannoista puuttuvat projektikohtaiset yhteystiedot vaikeuttivat datan

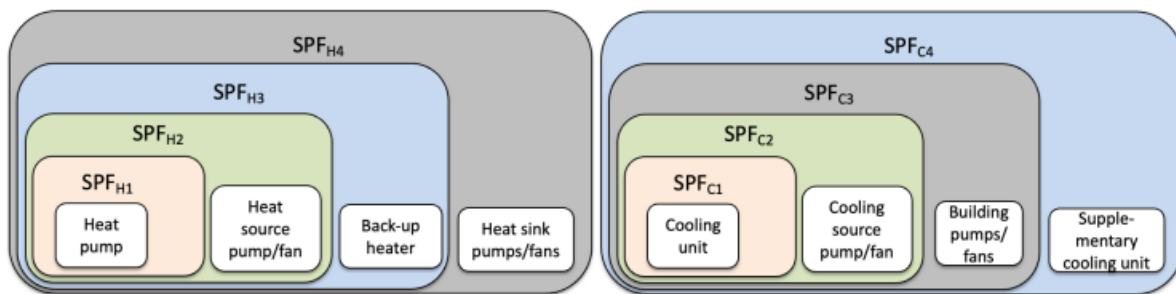
keräämistä. Tietokannan ylläpitäjät eivät voineet jakaa tietoja yksityisyyden suojan vuoksi ja toisaalta edes heillä itsellään ei ollut monien kohteiden yhteystietoja.

5.2. Energiatehokkuuden raportoinnin suositukset

On hyvin yleistä, että rakennuksen energijärjestelmien tehokkuutta ei seurata millään indikaattoreille. Usein tämä johtuu mittausten puutteesta. Seuraavaksi esitellään joitain indikaattoreita (KPI) yleisten energijärjestelmien toiminnan seuraamiseen ja vastaavien järjestelmien vertailuun.

5.2.1. Lämpöpumppujärjestelmät

Lämpöpumput muodostavat hybridienergijärjestelmien ytimen. Lämpöpumppujärjestelmistä pitäisi aina raportoida COP tai pidemmän aikavälin SPF-lämpökerroin. Tulee kuitenkin tietää mitä taseroja järjestelmässä käytetään (Kuva 26). Lämpöpumpun kompressorin kuluttaman sähkön lisäksi suositellaan huomioitavaksi kiertovesipumppujen sähköä. Erityisesti käytettäessä järjestelmää pienellä teholla, voi kiertopumppujen kulutus heikentää merkittävästi energiatehokkuutta.



Kuva 26. Lämpöpumpun SPF riippuu käytetyistä taseroista ja huomioituista komponenteista

Lämpöpumppujen tyypillisesti korkeat investointikulut tarkoittavat, että järjestelmän käyttö tulee maksimoida investointien kuolettamiseksi. Laskemalla järjestelmän kapasiteettikerroin, järjestelmän omistaja tai operaattori voi arvioida käytetäänkö lämpöpumppusijoitusta tehokkaasti. Kapasiteettikerroin on suhdeluku välillä 0...1 ja kertoo kuinka paljon energiaa tuotettiin suhteessa siihen mitä laite olisi voinut tuottaa käydessään koko ajan täydellä teholla.

$$\text{Kapasiteettikerroin} = CF = \frac{\text{Vuotuinen energiantuotanto}}{\text{Nimellisteho} \times 8760 \text{ h}}$$

Energiapeitto (tai energiapeittoaste) kuvaa lämpöpumpulla katettua osuutta lämmityksestä (tai jäähdytyksestä). Tämä on tärkeää, koska kalliimman varavoiman käyttöä tulisi välttää. Matala energiapeitto voi kertoa alimitoitetusta pääjärjestelmästä tai lämmönlähteiden rajoitteista. Esim. ennenaikaisesti jäähtyvä energia-kaivokenttä voi vähitellen pienentää energiapeittoa.

$$\text{Energiapeitto} = EC = \frac{\text{Vuotuinen lämmön tai kylmän tuotanto lämpöpumpulla}}{\text{Vuotuinen lämmön tai kylmän kulutus}}$$

Hybridijärjestelmissä tulisi myös tietää kuinka paljon lämpöä on kerätty eri lämmönlähteistä ja verrata sitä tavoitearvoihin. Eri lämmönlähteiden osuudet voi määrittää esim. kuukausitasolla.

Maalämpökenttiä hyödyntävissä järjestelmissä on erittäin tärkeää seurata energiavirtojen lisäksi myös energiakentän ja/tai keruuliuoksen lämpötiloja. Jos energiakentästä otetaan liikaa energiaa, sen lämpötila vähitellen laskee, vaikuttaen haitallisesti lämpöpumpun toimintaan. Vastaavasti, jos kenttää käytetään vapaajäähdytykseen ja sitä ladataan liikaa, voi nouseva lämpötila alkaa rajoittaa vapaajäähdytyksen käyttöä.

Lämpöpumppujen käynnistymisten määrästä (heat pump cycling) voidaan arvioida ohjausalgoritmien ja mitoituksen toimivuutta ja kartoittaa riskiä järjestelmän ennen aikaiseen huoltotarpeeseen.

5.2.2. Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenottojärjestelmät keräävät ylijäämälämpöä ilmanvaihdosta, jätevesistä ja viilennys/jäähdytysjärjestelmistä. Lämpötilasuhteista ja virtausmääristä voidaan päätellä talteenoton tehokkuutta suhteessa potentiaaliin lämpötilaeroihin.

Kerätyn energian lisäksi kannattaa laskea hukkaan mennyt energiamäärä, jotta voidaan arvioida sen potentiaalia lämpöpumppujen tai energiakaivojen latauksen lämmönlähteenä.

5.2.3. Energiavarastot

Energiavarastoissa varastoinnin hyötysuhde näyttää kuinka paljon varastoitua energiaa hukataan. Tämä sopii niin sähkö- ja lämpövarastojen kuin lyhyen ja pitkän ajan varastoinnin arviointiin. Varastoinnin hyötysuhde lasketaan vertaamalla tietyllä aikavälillä varastoon ladattua energiaa sieltä otettavaan energiaan. Kausivarastoissa kannattaa tutkia hyötysuhdetta vuositason, kun taas lyhyemmän aikavälin varastoissa voidaan tarkastella esim. viikko- tai kuukausitasoa.

$$\eta_{varastointi} = \frac{E_{otto}}{E_{lataus}}$$

Varastosyklien lukumäärä kertoo, kuinka usein varasto on tyhjennetty täydestä kapasiteetista. Tämä antaa lisätietoa siitä kuinka paljon varastoa käytetään. Odotetut arvot lyhyen ja pitkän aikavälin varastoille ovat kuitenkin hyvin erilaiset. Syklit voidaan laskea jakamalla tietyllä aikavälillä varastosta otettu energia täyteen ladatun varaston energiakapasiteetilla.

$$N_{syklit} = \frac{E_{otto}}{E_{kapasiteetti}}$$

Varastoidun energian kerroin (Stored Energy Factor, SEF) kertoo osuuden tietyn käyttötarkoituksen energiankulutuksesta (esim. päivän/kuukauden lämmitys/jäähdytys) tai uusiutuvan energian tuotannosta, joka vapautuu energiavarastosta (Del Pero et al., 2018). Kulutuksesta vähennetään verkkoon syötetty osuus.

$$SEF = \frac{E_{otto}}{E_{kulutus} + E_{lataus} - E_{myynti}}$$

5.2.4. Aurinkoenergiajärjestelmät

Kaikkea aurinkosähköä ei saada aina hyödynnettyä rakennuksessa. Tyypillisesti itse käytetyn sähköenergian arvo on korkeampi kuin verkkoon syötetyn energian. Aurinkosähkön paikallista käyttöä voi arvioida kahdella indikaattorilla. Oman käytön osuus (On-site Energy Matching, OEM tai Self-Consumption Ratio, SCR) kertoo sen osuuden paikallisesta tuotannosta, joka käytetään kohteessa. Loppu tyypillisesti myydään takaisin verkkoon, usein hyvin matalaan hintaan. Kulutuksen kattamisen osuus (On-Site Energy Fraction, OEF tai Solar Fraction, SF) taas kertoo, miten suuri osuus kohteen kulutuksesta saadaan katettua oikeaan aikaan tuotetulla paikallisenergialla.

$$OEM = \frac{E_{oma\ käyttö}}{E_{tuotanto}} = \frac{MIN(E_{tuotanto}, E_{kulutus})}{E_{tuotanto}}$$

$$OEF = \frac{E_{oma\ käyttö}}{E_{kulutus}} = \frac{MIN(E_{tuotanto}, E_{kulutus})}{E_{kulutus}}$$

5.2.5. Älykkäät ohjausjärjestelmät

Hintasignaali on tärkein kannustin kulutusjoustopalveluille. Laskemalla toteutuneen energianhinnan ja vertaamalla sitä keskimääräiseen spot-hintaan samalta ajanjaksolta saadaan arvio siitä kuinka hyvin energiajärjestelmä todellisuudessa hyödyntää halpoja tunteja. Keskimääräistä spot-hintaa vastaava tai korkeampi hinta osoittaa potentiaalin järjestelmän toiminnan optimoinnille.

$$p_{spot, toteuma} = \frac{\sum p_{spot, i} E_{kulutus, i}}{\sum E_{kulutus, i}}$$

Sekä kaukolämmön että sähkön kulutuksen osalta tulisi myös tietää kuukausikohtainen huipputeho, sillä nämä määräävät kiinteitä kuukausikuluja tuovien tehomaksujen suuruuden. Erityisesti kaukolämpö-lämpöpumppu-hybridijärjestelmissä ohjaus tulee suunnitella niin, että yllättäviä huipputehoja ei synny. Kaukolämmön hinnoittelumallit vaihtelevat, mutta muutaman tunnin piikkiteho voi aiheuttaa lisäkustannuksia useamman vuoden ajaksi kohonneen perusmaksun kautta.

5.2.6. Energiaraportoinnin esimerkkipohjia

Rakennuksen kulutuksesta ja sen energiajärjestelmien toiminnasta tulisi saada luotua kattavia raportteja, jotka koostavat lämpöpumppujärjestelmän tietoja nykyistä laajemmin ja liittävät mukaan myös muiden energiajärjestelmän osien toiminnan tietoja. Oleellisten energia- ja lämpötilamittausten lisäksi raportin tulisi sisältää kuvaus itse järjestelmästä, esim. lämpöpumpun ja energiavarastojen kapasiteetit.

Energiankulutus	MWh	kWh/m2
Sähkö	167	19
Lämpö	736	86
Jäähdytys	68	8

Lämmöntuotanto	MWh	kWh/m2	%
Kaukolämpö	252	29	34
Lämpöpumppu	484	56	66
Sähkökattila	0	0	0

LP:n käyttötapa	
Huipunkäyttöaika (h)	4208
Käynnistymisten määrä (1/vrk)	

Jäähdytys	MWh	kWh/m2	%
Lämpöpumppu	68	8	100
VJK	0	0	0

LP:n energiatehokkuus	Lämmitys	Jäähdytys	Yhteistuotanto
SPF ₁ : LP	3.2		3.6
SPF ₂ : LP + apulaitteet	2.9	9.3	3.3
SPF ₃ : LP + apulaitteet + lisälämpö	2.9		3.3

Lämpöpumpun lämmönlähteet ja kerätty energia	MWh	%
Tilojen jäähdytys	68	14.5
Muu lauhde	249	53.2
Poistoilma		
Jätevesi	48	10.3
Maalämpö	103	22.0
Maapiirin lataus	139	135.0

Maapiirin lämpötilat	°C
Ylin vuorokausikeskiarvo	8
Alin vuorokausikeskiarvo	4

Energiakustannus	€/MWh	% spot-keskiarvosta
Sähkön energian keskihinta	49	126
Tuotetun lämmön hinta	16,4	
Tuotetun jäähdytyksen hinta		

Lämpötila-alueiden vaikutus	<-20 °C	-19 °C...-15 °C	-14 °C...-10 °C	-9 °C...-5 °C	-5 °C...0 °C	0 °C...10 °C	>10 °C
LP:n energiapetto				64	76	72	47
SPF ₂				3.03	2.88	3.05	4.53

Aurinkosähkö	
Tuotanto (MWh)	12
Osuus kulutuksesta, OEF (%)	7
Oman käytön osuus, OEM (%)	90
Tuotannon arvo (spot) (€/MWh)	49
Tuotannon arvo (yht.)	107

Energiavarastot	Hyötysuhde (%)	Purkusykli (1/kk)	Lataushinta (€/MWh)	Purkuhinta (€/MWh)
Sähkövarasto	82	33	40,9	53,3
Lämpövarasto				

Energiajärjestelmä	
Lämpöpumpun teho (kW)	115
Aurinkosähkökapasiteetti (kW)	13
Akkukapasiteetti (kWh)	100

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennusten energiajärjestelmien monimutkaistuessa on kokonaiskulutuksen lisäksi tärkeää ymmärtää järjestelmän osien toimintaa myös erikseen. Tämä mahdollistaa paikallisten tehokkuusongelmien tunnistamisen ja korjaamisen. Sähkömyyjät pyrkivät siirtämään laskutusta tunti hinnoiteltuun malliin ja samalla vuorokauden sisäiset hintavaihtelut ovat viime vuosina moninkertaistuneet. On siis entistä tärkeämpää kyetä analysoimaan järjestelmän toimintaa tuntitasolla tai tarkemmin. Tuntidatasta voidaan laskea miten järjestelmän kustannukset suhtautuvat spot-sähkön vaihteleviin hintoihin ja arvioida voisiko järjestelmän toimintaa tehdä kustannustehokkaammaksi.

Tuntitason mittaukset auttavat arvioimaan sekä aurinkosähkön kannattavuutta että lämpöpumppujen kustannustehokkuutta. Tässä selvityksessä lämpöpumput eivät lähtökohtaisesti seuranneet spot-hintoja, minkä tähden niiden kustannustaso oli useimmiten markkinan keskihintaa suurempi. Tällainen kustannustason automaattinen arviointi tulisi tänä päivänä kuulua oletusarvoisesti jokaiseen energiaraporttiin. Tuntihintojen toteutuneen tason laskenta on hyödynnettävissä vastaavasti myös energiavarasto- ja aurinkosähköjärjestelmien vaikutusten arvioinnissa. Hyvin pienillä aurinkosähköjärjestelmillä (kulutukseen suhteutettuna), laskennan merkitys on tosin pienempää, jos kaikki tuotanto saadaan kulutettua suoraan kohteessa.

Lämpöpumppujen energiatehokkuus ja energiapetto vaihtelevat merkittävästi eri kohteiden välillä. Poistoilmalämpöpumput toimivat yleensä paremmalla hyötysuhteella kuin puhtaat maalämpöjärjestelmät, mutta niiden energiapetto on matalampi. Lämpöpumpuilla saadaan kuitenkin merkittävästi laskettua kaukolämmön kulutusta energiaremonttikohteissa ja ostosähkön perusteella laskettu lämmön hinta on huomattavasti kaukolämmön hintaa alhaisempi. Erityisesti palvelurakennuksissa lämpöpumppujen yhteydessä toteutettavat muut toimenpiteet voivat laskea sähkönkulutusta niin paljon, että lopputaso jää aiempaa alemmas jopa lämpöpumpun lisäämisen jälkeenkin.

Mittausdataa erilaisista energiajärjestelmistä on saatavilla huonosti. Tämä on ongelma sekä järjestelmien omistajille että suunnittelijoille, kun todellista energiatehokkuutta ja siten tehokkuusparannusten potentiaalia ei saada helposti selvitettyä. Monimutkaisten hybridienergiajärjestelmien energiaraportointia pitäisi standardoida ja automatisoida. Nyt yksittäisenkin järjestelmän tietojen kerääminen voi vaatia runsaasti työtä. Erilaisten raporttien automaattinen luominen pitäisi olla yhden napin painalluksen takana. Pelkän kokonaisenergiankulutuksen lisäksi pitäisi olla helposti nähtävissä merkittävien järjestelmien kausittainen energiatehokkuus, toteutunut energian hinta ja saatavilla olevien paikallisenergioiden käyttöaste. Samalla tulisi edes jollain tasolla varmistua datan paikkansapitävyydestä, automaattisen poikkeavuuksien tunnistamisen ja ehkä jopa datan korjaamisen avulla.

Helposti generoitavat, standardoidut raportit olisivat vaivattomia viedä energiatehokkuustietokantoihin, joiden kautta eri teknologioiden vaikutuksia saisi arvioitua helpommin. Tällainen luotettava tietokanta voisi toimia referenssinä sekä energia-alan toimijoille että energiaremontti-investointia pohtiville kiinteistöomistajille. Puolueeton tieto erilaisten järjestelmien taloudellisista vaikutuksista helpottaisi investointipäätöksen tekemistä.

LÄHTEET

Abdel-Salam, M. R., & Zaidi, A. (2021a). Field study of cooling performance of two ground-source heat pumps in Canadian single-family houses. *Applied Thermal Engineering*, 184, 116294. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116294>

Abdel-Salam, M. R., Zaidi, A., & Cable, M. (2021b). Field study of heating performance of three ground-source heat pumps in Canadian single-family houses. *Energy and Buildings*, 247, 110959. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110959>

Abu Bakar, N. N., et al. (2015). Energy efficiency index as an indicator for measuring building energy performance: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.018>

AECOM Ltd. (2024). *EBC Annual Report 2023* (Energy in Buildings and Communities Technology Collaboration Program). International Energy Agency. https://www.iea-ebc.org/Data/publications/EBC_Annual_Report_2023.pdf

Ahmed, K., Kurnitski, J., Sormunen, P. (2015). Demand controlled ventilation indoor climate and energy performance in a high performance building with air flow rate controlled chilled beams. *Energy and Buildings*, 109, 115–126. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.052>

Aira, R., Fernández-Seara, J., Diz, R., & Pardiñas, Á. Á. (2017). Experimental analysis of a ground source heat pump in a residential installation after two years in operation. *Renewable Energy*, 114, 1214–1223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.099>

Ala-Kotila, P., et al. (2020). Development of power based control strategies for buildings connected to district heating and various heat sources. *Smart Cities*, 3(2), 399–420. <https://doi.org/10.3390/smartcities3020009>

Al-Khatib, S. (2018). Key findings of the energy performance gap in a Finnish office building. Master's thesis, Aalto University. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/items/20d4c0d6-24b1-4414-b855-96aee935d971>. Viitattu 11.03.2026

Autio, P., Borgentorp, E., Pulkka, L., & Junnila, S. (2024). Smart Readiness Indicator: Ready for Business? Evidence from a Northern EU Country. *Buildings*, 14(11), 3638. <https://doi.org/10.3390/buildings14113638>

Baraskar, S., Günther, D., Wapler, J., & Lämmle, M. (2024). Analysis of the performance and operation of a photovoltaic-battery heat pump system based on field measurement data. *Solar Energy Advances*, 4, 100047. <https://doi.org/10.1016/j.seja.2023.100047>

Baumann, C., Huber, G., Alavanja, J., Preißinger, M., & Kepplinger, P. (2023). Experimental validation of a state-of-the-art model predictive control approach for demand side management with a hot water heat pump. *Energy and Buildings*, 285, 112923. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112923>

Bellanco, I., Fuentes, E., Vallès, M., & Salom, J. (2021). A review of the fault behavior of heat pumps and measurements, detection and diagnosis methods including virtual sensors. *Journal of Building Engineering*, 39, 102254. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102254>

- Besagni, G., Croci, L., Nesa, R., & Molinaroli, L. (2019). Field study of a novel solar-assisted dual-source multifunctional heat pump. *Renewable Energy*, 132, 1185-1215. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.076>
- Bi, J., Wang, H., Yan, E., Wang, C., Yan, K., Jiang, L., & Yang, B. (2024). AI in HVAC fault detection and diagnosis: A systematic review. *Energy Reviews*, 3(2), 100071. <https://doi.org/10.1016/j.enrev.2024.100071>
- Calì, D., Osterhage, T., Streblow, R., & Müller, D. (2016). Energy performance gap in refurbished German dwellings: Lesson learned from a field test. *Energy and buildings*, 127, 1146-1158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.020>
- Chen, J., Zhang, L., Li, Y., Shi, Y., Gao, X., & Hu, Y. (2022). A review of computing-based automated fault detection and diagnosis of heating, ventilation and air conditioning systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112395>
- Chesser, M., Lyons, P., O'Reilly, P., & Carroll, P. (2021). Air source heat pump in-situ performance. *Energy and buildings*, 251, 111365. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111365>
- Choi, Y., Ku, T. Y., & Park, W.-K. (2024). Data Cleaning Criteria in Residential Energy Consumption Data. *15th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 714–717. <https://doi.org/10.1109/ICTC62082.2024.10826810>
- Colclough, S., O'Donovan, A., McGrath, T., & Duffy, A. (2022). Post occupancy evaluation of 12 retrofit nZEB dwellings in Ireland: Energy and thermal comfort performance. *Energy and Buildings*, 254, 111563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111563> Energy
- Davis, J. M., Martinkauppi, I., Witte, H., Berglöf, K., & Vallin, S. (2021). *Guidelines for Instrumentation and Data* (IEA HPT Annex 52 - Long-Term Performance Monitoring of GSHP Systems for Commercial, Institutional, and Multi-Family Buildings). IEA. <https://doi.org/10.23697/tgr4-qn89>
- De Wilde, P. (2014). The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A frame work for investigation. *Automation in Construction*, 41, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- Del Pero, C., Aste, N., Paksoy, H., Haghighat, F., Grillo, S., & Leonforte, F. (2018). Energy storage key performance indicators for building application. *Sustainable Cities and Society*, 40, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.052>
- D'Ettorre, F., Conti, P., Schito, E., & Testi, D. (2019). Model predictive control of a hybrid heat pump system and impact of the prediction horizon on cost-saving potential and optimal storage capacity. *Applied Thermal Engineering*, 148, 524–535. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.063>
- van Dronkelaar, C., Dowson, M., Burman, E., Spataru, C., & Mumovic, D. (2016). A Review of the Energy Performance Gap and Its Underlying Causes in Non-Domestic Buildings. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 1. <https://doi.org/10.3389/fmech.2015.00017>
- Elsayed, M., Pelsmakers, S., Pistore, L., Castaño-Rosa, R., & Romagnoni, P. (2023). Post-occupancy evaluation in residential buildings: A systematic literature review of current practices in the EU. *Building and Environ*

ment, 236, 110307. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110307>

Energiahankkeet.fi. (2023, 3. lokakuuta). As Oy Helsingin Sorsavuorenkatu 14. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-helsingin-sorsavuorenkatu-14/>

Energiahankkeet.fi. (2024, 28. marraskuuta). Asunto Oy Untamola. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/asunto-oy-untamola/>

Energiahankkeet.fi. (2023). As Oy Sulkapolku 6. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-sulkapolku-6/>

Energiahankkeet.fi. (2023). As Oy Ainonkatu 2. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-ainonkatu-2/>

Energiahankkeet.fi. (2017). As Oy Tampereen Tapio. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-tampereen-tapio/>

Energiahankkeet.fi. (2017). As Oy Kaupinpirtti. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-kaupinpirtti/>

Energiahankkeet.fi. (2023, 21. marraskuuta). Takojantie 2–4. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/takojantie-2-4/>

Energiahankkeet.fi. (2025, 22. toukokuuta). Asunto-Oy Säästötuki. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/asunto-oy-saastotuki/>

Energiahankkeet.fi. (2024). As Oy Helsingin Vattuniemenkuja 8. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-helsingin-vattuniemenkuja-8/>

Energiahankkeet.fi. (2024). As Oy Pohjolankatu 18–20. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-pohjolankatu-18-20/>

Energiahankkeet.fi. (2024). As Oy Stoltinmaja. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-stoltinmaja/>

Energiahankkeet.fi. (2024). Kanteleen meijeri. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/kanteleen-meijeri/>

Energiahankkeet.fi. (2024, 25. kesäkuuta). As Oy Hakanmetsä. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-hakanmetsa/>

Energiahankkeet.fi. (2024). As Oy Maunulanmäki. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-maunulanmaki/>

Energiahankkeet.fi. (2024). As Oy Porintie 9 ja As Oy Ulvilantie 17a. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-porintie-9-ja-as-oy-ulvilantie-17a/>

Energiahankkeet.fi. (2023). As Oy Katajajarjuntie 15. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-katajajarjuntie-15/>

Energiahankkeet.fi. (2023). As Oy Syväkallio. Energiahankkeet.fi. <https://energiahankkeet.fi/hankkeet/as-oy-syvakallio/>

EPBD (2024). 2024/1275 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on the energy performance of buildings (recast). Saatavilla verkossa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj/>. Viitattu 11.03.2026.

European Parliament. (2018). Directive 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings. OJ L 156/75. Saatavilla verkossa: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/844/oj/eng>. Viitattu 11.03.2026.

Fan, C., Chen, M., Wang, X., Wang, J., & Huang, B. (2021). A Review on Data Preprocessing Techniques Toward Efficient and Reliable Knowledge Discovery From Building Operational Data. *Frontiers in Energy Research*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.652801>

Fingrid Oyj. (n.d.). Reservituottolaskuri. Saatavilla verkossa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservituottolaskuri/>. Viitattu 11.03.2026.

Fraga, C., Hollmuller, P., Mermoud, F., & Lachal, B. (2017). Solar assisted heat pump system for multifamily buildings: Towards a seasonal performance factor of 5? Numerical sensitivity analysis based on a monitored case study. *Solar Energy*, 146, 543-564. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.008>

Gehlin, S., & Spitler, D. J. (2022). *Case Study Summary Report* (IEA HPT Annex 52 – Long-Term Performance Monitoring of GSHP Systems Serving Commercial, Institutional and Multi-Family Buildings). IEA. <https://doi.org/10.23697/xsbr-xn83>

Gehlin, S., Spitler, J. D., Witte, H., Andersson, O., Berglöf, K., Davis, M., Javed, S., Bockelmann, F., Turner, J., & Clauss, J. (2022). *Guide for analysis and reporting of GSHP system performance – system boundaries and key performance indicators (KPI)* (IEA HPT Annex 52 - Long-Term Performance Monitoring of GSHP Systems for Commercial, Institutional, and Multi-Family Buildings). IEA. <https://doi.org/10.23697/xa7z-vd92>

Gollamudi, S., Fauchoux, M., Krishnan, E., Ramin, H., Joseph, A., & Simonson, C. (2024). Methodology to evaluate design modifications intended to eliminate frosting and high discharge temperatures in air-source heat pumps (ASHPs) in cold climates. *Energy and Buildings*, 312, 114209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114209>

Hajian, H., Ahmed, K., & Kurnitski, J. (2022). Dynamic heating control measured and simulated effects on power reduction, energy and indoor air temperature in an old apartment building with district heating. *Energy and Buildings*, 268, 112174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112174>

Han, Z., Ju, X., Ma, X., Zhang, Y., & Lin, M. (2016). Simulation of the performance of a hybrid ground-coupled heat pump system on the basis of wet bulb temperature control. *Applied Thermal Engineering*, 108, 980-988. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.171>

Hartikainen, J. (2014). Toteutuneiden ja laskennallisten energiakulutusten vertailu ja energiatehokkuuden tarkastelu asuinkohteissa. Saatavilla verkossa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201404073984>

Heiskanen, E. (n.d.). *EnergiaKokeilut.fi*. Retrieved September 5, 2025, from <https://energiakokeilut.gitlab.io/>

Helen Oy. (2023, October 10). *Mikä tuote valita sähkönsiirtoon? | Helen*. <https://www.helensahkoverkko.fi/yriytykset-ja-taloyhtiot/tietoa-sahkonkulutuksesta/mika-tuote-valita-sahkonsiirtoon>

Helen Oy. (2024). Vuosikatsaus 2024. Saatavilla verkossa: <https://www.helen.fi/tietoa-meista/helen/raportit-ja-julkaisut>. Viitattu 11.03.2026.

- Hirvonen, J., Jokisalo, J., Heljo, J., & Kosonen, R. (2019). Effect of apartment building energy renovation on hourly power demand. *International Journal of Sustainable Energy*, 38(10), 918-936. <https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1613992>
- Hyysalo, S., & Savolainen, K. (n.d.). *Energiahankkeet.fi*. Energiahankkeet.fi. Retrieved September 5, 2025, from <https://energiahankkeet.fi/>
- Janhunen, E., Pulkka, L., Säynäjoki, A. & Junnila, S. 2019. Applicability of the Smart Readiness Indicator for cold climate countries. *Buildings*, 9(4), 93. Saatavilla verkossa: <https://doi.org/10.3390/buildings9040102>. Viitattu 11.03.2026.
- Ju, Y., Hiltunen, P., Jokisalo, J., Kosonen, R., & Syri, S. (2023). Benefits through Space Heating and Thermal Storage with Demand Response Control for a District-Heated Office Building. *Buildings*, 13(10), 2670. <https://doi.org/10.3390/buildings13102670>
- Ju, Y., Jokisalo, J., & Kosonen, R. (2023). Peak shaving of a district heated office building with short-term thermal energy storage in Finland. *Buildings*, 13(3), 573. <https://doi.org/10.3390/buildings13030573>
- Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Ylipaino, J., Koskela, J., & Järventausta, P. (2025, June). Impacts of ground source heat pumps on peak power in apartment buildings: a case study from Finland. In 28th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2025) (Vol. 2025, pp. 2559-2563). IET. <https://doi.org/10.1049/icp.2025.2133>
- Kensby, J., Trüschel, A., & Dalenbäck, J. O. (2017). Heat source shifting in buildings supplied by district heating and exhaust air heat pump. *Energy Procedia*, 116, 470-480. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.094>
- Kensby, J., Trüschel, A., & Dalenbäck, J.-O. (2015). Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test. *Applied Energy*, 137, 773–781. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.026>
- Kilpeläinen, S., Simola, J., Mustakallio, P., & Kosonen, R. (2023). TALOTEKNIikka 2030-Toiminnan varmistaminen. Saatavissa: <https://research.aalto.fi/fi/publications/talotekniikka-2030-toiminnan-varmistaminen/>. Viitattu 11.03.2026.
- Kilpijärvi, A. (2015). Maalämpöpumppujen mitoituksien vertailu. Opinnäytetyö, Saimaan ammattikorkeakoulu. Theseus. <https://www.theseus.fi/handle/10024/89567>
- Kontu, K., Rinne, S., & Junnila, S. (2019). Introducing modern heat pumps to existing district heating systems – Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. *Energy*, 166, 862–870. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.077>
- Korttinen, J. (2023). *Toteutuneen energiankulutuksen laskennallinen jakautuminen rakennuksissa*. <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/165237>
- Kuopion Energia. (2024). *Kaukolämmön hinnat ja sopimusehdot*. Kuopion Energia. <https://www.kuopionenergia.fi/yritys/hinnat-ja-sopimusehdot/kaukolammon-hinnat-ja-sopimusehdot/>
- Kuosa, M., Rahiala, S., Tallinen, K., Mäkilä, T., Lampinen, M., Lahdelma, R., & Pulkkinen, L. (2019). Mass flow controlled district heating with an extract air heat pump in apartment buildings: A practical concept study. *Applied Thermal Engineering*, 157, 113745. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113745>

Li, H., Xu, W., Yu, Z., Wu, J., & Sun, Z. (2017). Application analyze of a ground source heat pump system in a nearly zero energy building in China. *Energy*, 125, 140-151. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.108>

Li, H., Hong, T., Lee, S. H., & Sofos, M. (2020). System-level key performance indicators for building performance evaluation. *Energy and Buildings*, 209, 109703. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109703>

Li, P., Froese, T. M., & Brager, G. (2018). Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review. *Building and Environment*, 133, 187–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.024>

Li, Z., Sun, Y., Wang, W., & Wei, W. (2025). An improved equivalent temperature drop method for evaluating the operating performances of ASHP units under frosting conditions considering their configuration and operation. *Energy and Buildings*, 331, 115370. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115370>

Lygnerud, K., Ottosson, J., Kensby, J., & Johansson, L. (2021). Business models combining heat pumps and district heating in buildings generate cost and emission savings. *Energy*, 234, 121202. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121202>

Melgaard, S. P., Andersen, K. H., Marszal-Pomianowska, A., Jensen, R. L., & Heiselberg, P. K. (2022). Fault detection and diagnosis encyclopedia for building systems: A systematic review. *Energies*, 15(12), 4366. <https://doi.org/10.3390/en15124366>

Neubert, D., Glück, C., Schnitzius, J., Marko, A., Wapler, J., Bongs, C., & Felsmann, C. (2022). Analysis of the operation characteristics of a hybrid heat pump in an existing multifamily house based on field test data and simulation. *Energies*, 15(15), 5611. <https://doi.org/10.3390/en15155611>

Neubert, D., Glück, C., Wapler, J., Marko, A., Bongs, C., & Felsmann, C. (2024). Field trial evaluation of a hybrid heat pump in an existing multi-family house before and after renovation. *Energies*, 17(6), 1502. <https://doi.org/10.3390/en17061502>

Nilsson, A., Lazarevic, D., Brandt, N., & Kordas, O. (2018). Household responsiveness to residential demand response strategies: Results and policy implications from a Swedish field study. *Energy policy*, 122, 273-286. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.044>

O'Hegarty, R., Kinnane, O., Lennon, D., & Colclough, S. (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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111887>

Ottosson, J., Johansson, L., Kensby, J., Lygnerud, K., Nilsson, J., & Nilsson, A. (2020). Affärsmodeller för fjärrvärme och värmepumpar i fastigheter (Energiforskrappport 2020:678). Saatavilla verkossa: <https://energiforsk.se/media/28241/affarsmodeller-for-fjarrvarme-och-varmepumpar-energiforskrappport-2020-678.pdf> Viitattu 11.03.2026.

Pesola, A. (2023). Cost-optimization model to design and operate hybrid heating systems—Case study of district heating system with decentralized heat pumps in Finland. *Energy*, 281, 128241. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128241>

- Popsueva, V., Lopez, A. F. O., Kosinska, A., Nikolaev, O., & Balakin, B. V. (2021). Field study on the thermal performance of vacuum tube solar collectors in the climate conditions of Western Norway. *Energies*, 14(10), 2745. <https://doi.org/10.3390/en14102745>
- Puttige, A. R., Andersson, S., Östin, R., & Olofsson, T. (2022). Modeling and optimization of hybrid ground source heat pump with district heating and cooling. *Energy and Buildings*, 264, 112065. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112065>
- Rupar-Gadd, K., Gelius, M., & Wickman, P. (2025). Energy efficiency and economy with hybrid control: District heating and heat pumps in multi-family houses. *Energy and Buildings*, 115897. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115897>
- Saffari, M., Keogh, D., De Rosa, M., & Finn, D. P. (2023). Technical and economic assessment of a hybrid heat pump system as an energy retrofit measure in a residential building. *Energy and Buildings*, 295, 113256. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113256>
- Shah, N., Wilson, C., Huang, M., & Hewitt, N. (2018). Analysis on field trial of high temperature heat pump integrated with thermal energy storage in domestic retrofit installation. *Applied Thermal Engineering*, 143, 650-659. Article ATE12493. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.135>
- Söderholm, N., Gröndahl, M., Niemelä, T., Jokisalo, J., Kosonen, R., & Ni, L. (2025). Validation of a Heat Pump System Model for Energy Recycling in Grocery Stores Through On-Site Energy Monitoring. *Energies*, 18(4), 1003. <https://doi.org/10.3390/en18041003>
- Spitler, J. D., Gehlin, S. (2022). Performance of a mixed-use ground source heat pump system in Stockholm. In CLIMA 2022 conference. <https://doi.org/10.34641/clima.2022.126>
- Spitler, J. D., Berglöff, K., Pallard, W. M., & Witte, H. (2021). *Guidelines for Calculation of Uncertainties* (IEA HPT Annex 52 - Long-Term Performance Monitoring of GSHP Systems for Commercial, Institutional, and Multi-Family Buildings). <https://doi.org/10.23697/m2em-xq83>
- Sun, T., Yang, L., Jin, L., Luo, Z., Zhang, Y., Liu, Y., & Wang, Z. (2020). A novel solar-assisted ground-source heat pump (SAGSHP) with seasonal heat-storage and heat cascade utilization: Field test and performance analysis. *Solar Energy*, 201, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.030>
- Takahashi, K., Ooka, R., & Ikeda, S. (2021). Anomaly detection and missing data imputation in building energy data for automated data pre-processing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2069(1), 012144. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012144>
- Thalfeldt, M., Kurnitski, J., & Latšov, E. (2018). Exhaust air heat pump connection schemes and balanced heat recovery ventilation effect on district heat energy use and return temperature. *Applied Thermal Engineering*, 128, 402-414. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.033>
- Verbeke, S., Aerts, D., Reynders, G., Ma, Y., & Waide, P. (2020). Final report on the technical support to the development of a smart readiness indicator for buildings. European Commission, DG Energy. <https://doi.org/10.2833/600706>

Wang, X., Zheng, M., Zhang, W., Zhang, S., & Yang, T. (2010). Experimental study of a solar-assisted ground-coupled heat pump system with solar seasonal thermal storage in severe cold areas. *Energy and Buildings*, 42(11), 2104–2110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.06.022>

Woroniak, G., Piotrowska-Woroniak, J., Woroniak, A., Owczarek, E., & Giza, K. (2024). Analysis of the Hybrid Power-Heating System in a Single-Family Building, along with Ecological Aspects of the Operation. *Energies*, 17(11), 2601. <https://doi.org/10.3390/en17112601>

Xue, P., Li, Q., Xie, J., Zhao, M., Liu, J. (2023). Long-term performance analysis of a hybrid ground source heat pump system in Finland. *REHVA Journal*, 61(1), 53–57. Saatavissa: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/long-term-performance-analysis-of-a-hybrid-ground-source-heat-pump-system-in-finland>. Viitattu 11.03.2026.

Xu, L., Wang, Z., Liu, Y., & Xing, L. (2021). Energy allocation strategy based on fuzzy control considering optimal decision boundaries of standalone hybrid energy systems. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123810>

Xue, T., Jokisalo, J., & Kosonen, R. (2024a). Demand Response Potential of an Educational Building Heated by a Hybrid Ground Source Heat Pump System. *Energies*, 17(21), 5428. <https://doi.org/10.3390/en17215428>

Xue, T., Jokisalo, J., & Kosonen, R. (2024b). Cost-Effective Control of Hybrid Ground Source Heat Pump (GSHP) System Coupled with District Heating. *Buildings*, 14(6), 1724. <https://doi.org/10.3390/buildings14061724>

Ympäristöministeriö. (2024). *Rakennusten energiatehokkuus*. Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriö. <https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuus>

Zhi, C., Zhou, X., Hong, X., Wang, A., Ye, W., Zhang, X., & Chen, H. (2025). Field study of the long-term performance and reliability of large-scale ground source heat pump systems applied to a mixed-use complex of buildings. *Renewable Energy*, 241, 122344. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122344>

Zhou, C., Riaz, A., Wang, J., Zhang, J., & Xu, L. (2023). Photovoltaic thermal heat pump assessment for power and domestic hot water generation. *Energies*, 16(19), 6984. <https://doi.org/10.3390/en16196984>