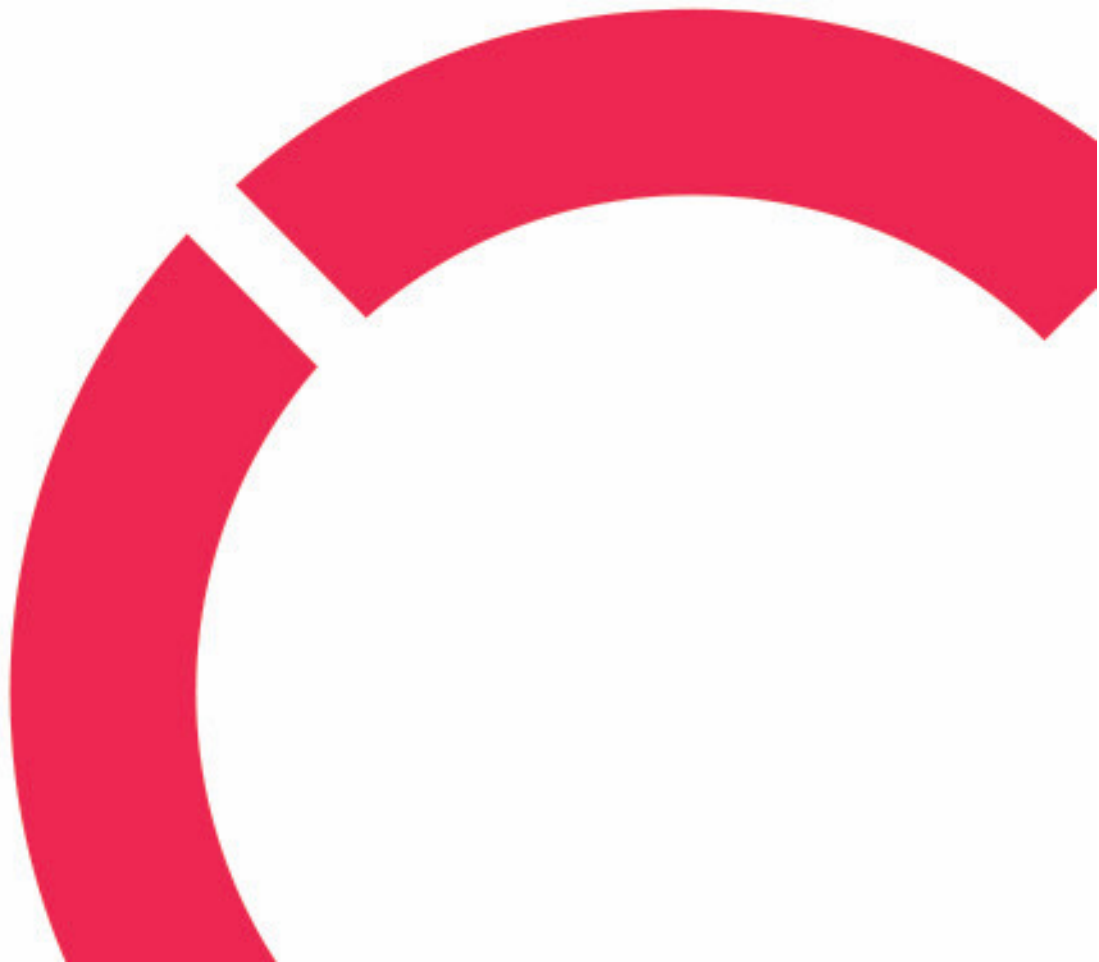


Henry Roustik

**LÄMPÖPUMPPUJEN JA KYLMÄKONEIKKOJEN OHJAUS JA
ENERGIATEHOKKUUS**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Tammikuu 2026**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Tammikuu 2026	Tekijä/tekijät Henry Roustik
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi LÄMPÖPUMPPUJEN JA KYLMÄKONEIKKOJEN OHJAUS JA ENERGIATEHOKKUUS		
Työn ohjaaja Aki Suokko		Sivumäärä 31
<p>Opinnäytetyössä tarkasteltiin, miten lämpöpumppuja ja kylmäkoneikkoja ohjattiin energiatehokkaasti ilman käyttövarmuuden heikkenemistä. Tavoitteena oli koota kirjallisuuteen perustuva, käytännönläheinen ohjeistus, jota voitiin soveltaa kiinteistökohteissa.</p> <p>Työ rajattiin kylmähöyrykiertoon perustuviin lämmitys- ja jäähdytysratkaisuihin. Menetelmänä käytettiin narratiivista kirjallisuuskatsausta, uutta mittausaineistoa ei kerätty. Katsauksen perusteella kylmäkoneikkojen suorituskyky riippui enemmän ohjauksesta kuin yksittäisestä laitevalinnasta. Vaikuttavimmiksi keinoiksi tunnistettiin lauhdutuslämpötila leudoissa oloissa, höyrystystason nosto sallituissa rajoissa, kompressorin ja pumppujen ja puhaltimien invertterisäätö sekä ilmalähteisissä järjestelmissä tarveperusteinen sulatus.</p> <p>Dynaaminen asetusarvojen resetointi (meno-/kylmävesilämpötila ja lauhdutuslämpötila) sopeutti prosessin osakuormaan, joka hallitsi käyttöaikaa. Toimeenpano edellytti riittävää anturointia (lämpötila, paine, painehäviö, virtaus, sähköteho), 1–5 minuutin trendiseurantaa, selkeää pisteiden nimeämistä ja KPI-perusteista todennusta (esim. COP/EER, SCOP/SEER, käynnistyskerrat ja -tunnit, sulatusten määrä ja kesto).</p> <p>Työssä esitettiin vaiheittainen käyttöönoton malli: suojat ja trendit kuntoon, konservatiiviset resetit ja kellutus, inverttereiden viritys kantamaan peruskuormaa sekä sulatuslogiikan muuttaminen tarveperusteiseksi, minkä jälkeen vaikutus arvioitiin kuukausikatselmuksissa. Lämmön talteenottoa suositeltiin prioriteettilogiikalla, jotta lauhdutuksen lämpötila ei noussut tarpeettomasti. Koska työ perustui kirjallisuuteen, tulokset kuvasivat vaikutusmekanismeja ja ne tuli varmistaa kohdekohtaisissa piloteissa. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että kylmäkoneikkojen energiatehokkuus näyttää työni perusteella riippuvan enemmän ohjauksen ja seurannan laadusta ei niinkään laitevalinnoista.</p>		

<p>Asiasanat Anturointi, energiatehokkuus, järjestelmä-COP, kylmäkoneikko, lauhdutuksen kellutus, lämpöpumppu, ohjausstrategiat, rakennusautomaatio, SCOP, sulatus</p>

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date January 2026	Author Henry Roustik
Degree programme Electrical and Automation Engineering		
Name of thesis OPERATION AND ENERGY EFFICIENCY HEAT PUMPS AND CHILLERS		
Centria supervisor Aki Suokko	Pages 31	
<p>This thesis examined how heat pumps and chillers should be operated to improve energy efficiency without compromising reliability. The purpose was to compile practice-oriented guidance based on literature. The scope was limited to vapour-compression systems in building applications. The study was conducted as a narrative literature review, and no new measurements were collected. The review showed consistently that performance depended more on control than on the equipment itself. The most effective measures were floating condensing at mild ambient conditions, raising the evaporation level within safe limits, variable-speed control of the compressor, pumps and fans, and demand-based defrost for air-source systems. Dynamic setpoint reset for supply/chilled water and condensing temperature adapted the process to part-load operation, which dominates annual use. Effective implementation required adequate instrumentation (temperature, pressure, ΔP, flow and electrical power), 1–5-minute trend logging, clear point naming and KPI-based verification. A staged commissioning model was presented: secure protections and trends, introduce conservative resets and floating condensing, tune variable-speed devices to carry base load, and convert defrost to demand-based logic, followed by monthly KPI reviews. Heat recovery was recommended with priority control so that condensing temperature was not increased more than necessary. As a literature study, the results described mechanisms rather than site-specific savings and should be validated in pilot projects. The overall conclusion was that energy efficiency is primarily a matter of control and monitoring.</p>		

Key words building automation, control strategies, energy efficiency, heat pump, heat recovery, IoT monitoring, seasonal COP, setpoint reset, variable-speed control
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

BMS/SCADA

Rakennusautomaatio-/valvontajärjestelmä, joka kokoaa trendit, hälytykset ja mahdollistaa etäseurannan.

COP (Coefficient of Performance)

Hetkellinen suorituskyky: lämmityskäytössä se on tuotetun lämpötehon suhde kompressorikoneikon sähkönkulutukseen (-).

ΔP (delta p)

Paine-ero käytetään mm. suodattimien likaisuuden, virtaaman ja pumppukuorman arviointiin.

ΔT (delta t)

Lämpötilaero esim. menon ja paluun välinen ero lämmitys- tai jäähdytysverkossa.

EER (Energy Efficiency Ratio)

Hetkellinen suorituskyky jäähdytyskäytössä: tuotettu jäähdytysteho jaettuna sähkönkulutuksella (-).

Etävalvonta / IoT

Järjestelmän tilan ja suorituskyvyn seuranta verkon yli; mahdollistaa analytiikan ja hälytykset.

FDD (Fault Detection & Diagnostics)

Automaattinen vika- ja poikkeamalöytö sekä niiden syiden diagnostiikka trendidatan avulla.

GWP (Global Warming Potential)

Kylmäaineen ilmastolämmitysvaikutus suhteessa hiilidioksidiin (CO₂-ekv.).

HP-chiller / Lämpöenergian talteenotto

Käyttötapa, jossa jäähdytyskoneen lauhdelämpö hyödynnetään tarkoituksellisesti (esim. käyttövesi, lämmitys).

Invertterisäätö (VFD)

Kompressorin, pumpun tai puhaltimen taajuusohjaus, jolla tuotanto sovitetaan kuormaan portaattomasti.

KPI-Mittarit

SCOP/SEER, COP/EER, käyntitunnit ja -kerrat, sulatusten määrä ja kesto sekä pumppujen/puhaltimien keskimääräinen taajuus.

COP / SPF (Seasonal Performance Factor)

Kausihyötysuhteen käytännön mittari, jossa huomioidaan myös apulaitteiden (pumput, puhaltimet) kulutus.

Paisuntaventtiili (TEV/EEV)

Alentaa paineen ja syöttää kylmääainetta höyrystimeen. TEV = mekaaninen, EEV = sähköinen ohjaus.

Paisuntaventtiili tähtää sopivaan ylikuumenemaan eli tulistukseen höyrystimen jälkeen.

SCOP (Seasonal COP)

Kausilämpökerroin lämmityskäytössä, huomioi osakuorman ja ilmastopainotukset (EN 14825).

SEER (Seasonal EER)

Kausikylmäkerroin jäähdytyskäytössä, huomioi osakuorman ja ilmastopainotukset (EN 14825).

Short cycling (jaksotus)

Tiheä käynnistely/pysäyttely on/off-ohjauksessa, heikentää hyötysuhdetta ja kuormittaa kompressoria.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 LÄMPÖPUMPPUTEKNIikka JA KYLMÄKONEIKKOJEN PERUSTEET	4
2.1 Lämpöpumppujen toimintaperiaate	5
2.2 Kylmäkoneikojen rakenne ja toiminta	6
2.3 Yleisimmät kylmäaineet ja niiden ominaisuudet	7
2.4 Käyttökohteet	8
3 OHJAUSJÄRJESTELMÄT	10
3.1 Ohjauksen perusteet ja tavoitteet	11
3.2 Perinteiset ohjausratkaisut.....	13
3.3 Edistyneet ohjausmenetelmät	15
3.4 Tiedonkeruu ja anturitekniikka	17
3.5 Etävalvaonta ja IoT-integraatio.....	19
4 ENERGIATEHOKUUDEN NÄKÖKULMA.....	21
4.1 Energiatehokkuuden määritelmä ja merkitys.....	22
4.2 COP- ja EER-arvot sekä niiden optimointi.....	23
4.3 Lämpöenergian talteenotto ja hyödyntäminen	24
4.4 Käytön aikainen seuranta ja energiahallinta	26
5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	28
LÄHTEET	30

KUVIOT

KUVIO 1. Höyrypuristuskierto ja päävaiheet.....	4
---	---

1 JOHDANTO

Rakennusten lämmitys ja jäähdytys sähköistyvät vauhdilla, mikä kiristää energiatehokkuus- ja päästövaatimuksia. Lämpöpumput ja kylmäkoneikot ovat tässä muutoksessa keskeinen teknologia, koska ne siirtävät lämpöä matalammalta tasolta korkeammalle hyvällä hyötysuhteella ja mahdollistavat sekä lämmön että viilennyksen tuottamisen samasta järjestelmästä. Käytännön kohteissa laitteiston nimellisuorituskyky tai myyntiesitteissä ilmoitettu COP/EER ei kuitenkaan kerro koko totuutta. Todellinen energiankulutus määräytyy siitä, millä lämpötilasoilla kylmäkoneikko toimii, millä käytettävällä järjestelmää ohjataan vaihtelevissa olosuhteissa vuoden ympäri sekä kuinka hyvin ohjaus sopeutuu osakuormaan, jossa laitteisto toimii valtaosan käyttäjastaan.

Monessa rakennuksessa ongelma ei ole varsinainen laite, vaan sen ohjaus. Kiinteät menoveden, kylmän veden ja lauhdutuksen asetusarvot pitävät puristussuhteen turhan korkeana leudoissa oloissa, on/off-ohjaus aiheuttaa jaksotusta ja käynnistys-pysäytyshäviöitä ja pumput ja puhaltimet pyörivät tarpeettoman kovaa, koska nopeus ei mukaudu kuormaan. Ilmalähteissä ajastettu sulatus katkaisee hyötysuhteen silloinkin, kun jäätä ei ole muodostunut. Lisäksi anturointi ja trendiseuranta ovat usein puutteellisia. Jos lämpötilat, paineet, virtaamat ja sähkönkulutus eivät tallennu riittävällä tiheydellä ja selkeillä nimillä, optimointia ei voi todentaa eikä ylläpitää.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa kirjallisuuteen perustuva, käytännönläheinen kokonaiskuva siitä, miten lämpöpumppuja ja kylmäkoneikkoja kannattaa ohjata energiatehokkaasti ilman käyttövarmuuden heikkenemistä. Tarkastelu kohdistuu sekä laitetasoon (kompressorin kuormansäätö, paisuntaventtiilin ohjaus, sulatuslogiikka) että järjestelmätasoon (lämmön- ja kylmänjaon set Point-strategiat, pumppujen ja puhaltimien taajuusohjaus, rakennusautomaatio ja etävalvonta). Työn teema on käytännöllinen: miten ohjausta muutetaan niin, että kompressorin puristussuhde ja sähkönkulutus pysyvät mahdollisimman pieninä kaikissa olosuhteissa ja miten muutoksen vaikutus todennetaan luotettavasti.

Työ rajautuu höyrypuristuskiertoon perustuviin kiinteistöjen lämmitys- ja jäähdytysratkaisuihin. Teolliset erikoisprosessit, absorptio- ja ejektoriratkaisut sekä yksityiskohtainen mitoitus jäävät tarkastelun ulkopuolelle, elleivät ne ole välttämättömiä ohjauksen ymmärtämiseksi. Uutta mittausaineistoa ei kerätty, vaan toteutustapa on narratiivinen kirjallisuuskatsaus, jota täydennettiin tarvittaessa valmistajien

suorituskykymapeilla ja kevyillä laskennallisilla esimerkeillä. Suorituskyvyn viitekehys tukeutui ensisijaisesti standardeihin SFS-EN 14511 (nimelliset testipisteet) ja SFS-EN 14825 (kausittainen suorituskyky) sekä SFS-EN 378 (turvallisuus) ja ISO 817 (kylmäaineiden luokitus). Täydentävinä lähteinä hyödynnettiin suomalaisia opinnäytteitä (Elo 2023; Kuusisto 2021; Kontio 2020; Jokinen 2024), jotka kuvasivat ohjauksen vaikutuksia, kunnossapitoa ja kylmäainevalintoja kotimaisissa käyttöympäristöissä.

Tutkimuskysymykset ovat:

Mitkä ohjausstrategiat (esim. lauhdutuksen kellutus, menoveden/kylmäveden dynaaminen resetointi, invertterisäätö, tarveperusteinen sulatus) vaikuttavat voimakkaimmin hetkelliseen suorituskykyyn (COP/EER) ja kausitasolla SCOP/SEER-arvoihin rakennuskohteissa?

Millä reunaehdoilla (öljynpaluu, minimi-ilmavirrat ja -kierrosluvut, jäätymissuojat) nämä strategiat voidaan ottaa käyttöön turvallisesti ja ilman käyttökatkoksia?

Millainen anturointi ja trendiseuranta (mitä mitataan, millä näytteenotolla ja miten pisteet nimetään) tarvitaan vaikutusten todentamiseen ja ylläpitämiseen käytännössä?

Miten lämmön talteenotto (HP-chiller/heat recovery) priorisoidaan niin, ettei lauhdutuksen loppupaine nouse tarpeettomasti, kun sama kompressorityö tuottaa sekä jäähdytyksen että hyödynnettävän lämmön?

Keskeiset käsitteet kuvataan tiiviisti. COP ja EER ilmaisevat hetkellisen suorituskyvyn lämmitys- ja jäähdytyskäytössä, kun taas SCOP ja SEER huomioivat osakuorman ja ilmaston painotukset kausitasolla (SFS-EN 14511; SFS-EN 14725). Puristussuhde määräytyy lauhdutuksen ja höyrystyksen välisestä lämpötilan tai paineen nostosta, mitä pienempi nosto, sitä pienempi on kompressorin työ. Lauhdutuksen kellutus tarkoittaa lauhdutuslämpötila automaattista alentamista leudoissa oloissa. Invertterisäätö mahdollistaa portaattoman kuormansovituksen. Ilman jaksotusta tarveperusteinen sulatus käynnistyy ja päättyy antureiden perusteella, ei kellon mukaan. Järjestelmätason COP käsittelee hyötysuhdetta kokonaisuutena siten, että nimittäjään sisällytetään kompressorin lisäksi myös pumppujen ja puhaltimien kulutus. Tämä on käytännön kohteissa usein relevantimpi mittari kuin pelkän kompressorin COP. (SFS-EN 14825.)

Sekä tutkimukset, että standardit viittaavat siihen, että suurimmat ja varmimmat säästöt syntyvät nimenomaan ohjauksen kautta (Kontio 2020, 13–15; Morsari 2025, 14–16; SFS-EN 14825). Lauhdutuksen tason kellutus ja höyrystystason nosto jäähdytyskohteen määräämissä rajoissa laskevat puristus-suhdetta (Perälä 2009, 31–35). Invertterikompressori poistaa käyntijaksotusta ja pitää prosessin lähellä tavoitetta, pumppujen ja puhaltimien taajuusohjaus leikkaa osakuormalla korostuvaa siirtotyötä. Tarveperusteinen sulatus vähentää turhia 5–15 minuutin jaksoja, jotka muuten heikentäisivät kausihyötysuhdetta (SFS-EN 14825). Lämmön talteenottoa hyödyntämällä sama kompressorityö voidaan valjastaa kahteen hyötyyn eli jäähdytykseen ja lämpöön, kun ohjauksella varmistetaan, ettei lauhdutuksen tasoa koroteta enempää kuin käyttötarve edellyttää (Hakala&Kaappola 2013, 51).

Luvussa 2 kuvataan höyrypuristuskierron peruseriaatteet, keskeiset komponentit ja kylmäainevalinnat sekä tavallisimmat käyttöympäristöt. Luvussa 3 käsitellään ohjausjärjestelmä laitetasosta rakennusautomaatioon ja IoT-analytiikkaan ja kuvataan ohjausmenetelmät, joilla on suurin vaikutus kausihyötysuhteeseen. Luvussa 4 tarkastellaan energiatehokkuutta järjestelmätasolla ja kootaan ohjauksen vaikutusmekanismit sekä mittarit, joilla muutokset todennetaan ja pidetään yllä. Työn lopussa esitetään johdopäätökset sekä käytännön suositukset käyttöönoton, priorisoinnin ja seurannan toteuttamiseksi.

2 LÄMPÖPUMPPUTEKNIikka JA KYLMÄKONEIKKOJEN PERUSTEET

Tässä luvussa esitetään lämpöpumppujen ja kylmäkoneikkojen toiminnan peruseriaatteet sekä keskeiset käsitteet, joihin myöhempi ohjauksen ja energiatehokkuuden tarkastelu nojaa. Luku etenee kiertoprosessin kuvauksesta laite- ja komponenttitasolle, minkä jälkeen käsitellään kylmäaineiden valinnan perusteita sekä tyypillisiä käyttöympäristöjä rakennus- ja teollisuussovelluksissa. Tarkastelu rajoittuu kylmähöyrykiertoon perustuviin järjestelmiin, joita käytetään laajasti kiinteistöjen lämmitys- ja jäähdytysratkaisujen toteuttamisessa.

Lämmityskäytössä lämpöpumppu nostaa matalan lämpötilatason lämpöä korkeampaan lämpötilaan, jolloin lämpö voidaan luovuttaa rakennuksen lämmönjakoon tai käyttöveden valmistukseen (Hänninen, Karppinen, Leskelä & Pohjakallio 2019, 220). Jäähdytyskäytössä (kylmäkoneikko) sama periaate tuottaa jäähdytysenergiaa, jota hyödynnetään esimerkiksi kiertovesipiireissä tai puhallinkonvektoreissa (Perälä 2013; Hausen & Hyvärinen 2004). Molemmissa tapauksissa järjestelmän sähköenergiankulutus määräytyy ennen kaikkea kompressorin tekemän työn, apulaitteiden (pumput, puhaltimet) tarpeen sekä vallitsevien lämpötilaerojen perusteella (Seppänen 2007; Kaappola ym. 2022).



KUVIO 1. Kylmähöyrykiertoa ja päävaiheet. (Kaappola 2014, 17)

2.1 Lämpöpumppujen toimintaperiaate

Lämpöpumppu siirtää lämpöä matalammasta lämpötilatasosta korkeammalle höyrystyskierto avulla. Peruskierto muodostuu neljästä pääkomponentista: höyrystimestä, kompressorista, lauhduttimesta ja paisuntalaitteesta (KUVIO 1). Kiertoa kuvataan usein log p, h -tasossa, josta voidaan lukea työaineen eli tässä tapauksessa kylmäaineen olomuodot sekä prosessin vaiheiden entalpia- ja painearvot. (Kaappola, Hirvelä, Jokela & Kianta 2014, 19–23; 26–30.)

Lämmityskäytössä hyödynnetään lauhduttimessa vapautuva energia rakennuksen lämmönjakoon tai käyttöveden valmistukseen. Jäähdytyskäytössä puolestaan ”hyöty” otetaan höyrystimen välityksellä jäähdytysenergiana. (Perälä 2009, 36; 80).

Hetkellistä suorituskykyä kuvataan COP-arvolla (lämmitys) ja EER-arvolla (jäähdytys). Kausitasolla käytetään SCOP/SEER-mittareita, jotka huomioivat osakuormat ja vaihtelevat olosuhteet. COP/EER-määritelmät sekä niiden laskentakaava ja standardipisteiden (+7 °C ulkoilma jne.) viittaukset on koottu selkeästi. (Kontio 2020, 15.)

Käyttövarmuutta ja hyötysuhdetta ohjataan tulistuksen ja alijäähdytyksen hallinnalla. Paisuntalaite voi olla mekaanisesti (eli TEV) tai sähköisesti ohjattu (eli EEV) (Kaappola ym. 2014, 19–30).

Lämmönlähteen luonne määrittää höyrystimen olosuhteita. Ilma-vesi- ja ilma-ilmaratkaisuissa kuura ja jää heikentävät lämmönsiirtoa pakkasella, minkä vuoksi tarvitaan sulatus. Sulatuksen vaikutus COP:iin sekä tyypillinen 5–15 min sulatusjakso (Kontio 2020, 15–16). Vastaavasti maa- ja vesistölähteissä lähdelämpötila on tasaisempi, mikä tukee osakuormatehokkuutta (Perälä 2009; 36, 77, 80, Kraft 2024, 18–21).

Kertauksena voidaan todeta, että lämpöpumpun suorituskyky määräytyy kompressorin puristuksen hyötysuhteen ohella muun muassa lauhdutuksen ja höyrystyksen lämpötilatasoista (puristussuhde), tulistuminen/alijäähdytyksen hallinnasta sekä kuormansäädöstä ja apulaitteiden siirtotyöstä. Kun lämpötilanosto pidetään tarpeeseen nähden pienenä ja ohjaus sopeutetaan olosuhteisiin, saavutetaan korkea hyötysuhde (Kaappola ym. 2014, 19–30; Kontio 2020, 15).

2.2 Kylmäkoneikkojen rakenne ja toiminta

Kylmäkoneikko on höyrypuristuskiertoon perustuva laitekokonaisuus, jonka tehtävä on tuottaa jäähdytysenergiaa/kylmää höyrystimen toisella puolella olevaan tilaan ja poistaa syntyvä lämpö lauhduttimen kautta. Perusrakenne muodostuu kompressorista, lauhduttimesta, paisuntalaitteesta ja höyrystimestä, ja prosessissa kiertävä kylmäaine vaihtaa olomuotoaan lämmönsiirtimissä. (Vaillant, 2022.)

Koneikoissa käytetään tyypillisesti mäntä-, kierukka-, ruuvi- ja turbokompressoreita. Kompressorityypin valinta riippuu tehoalueesta, kuormitusprofiilista ja käytetystä kylmäaineesta. Suuntaa antavasti kierukka ~0–500 kW, mäntä ~0–1000 kW, ruuvi ~200–5000 kW ja turbo ~350–30 000 kW. Monikompressorikoneikoissa kuormaa porrastetaan ja yhdistelmä valitaan hyötysuhteeltaan edulliseksi (esim. invertteri + on/off). (Kuusisto 2021, 13.)

Lauhduttimen tehtävä on muuttaa kompressorilta tuleva kuumakaasu nesteeksi ja luovuttaa lämpö ulkoilmaan tai välillisesti nesteeseen. Ilmajäähdytteisissä lauhduttimissa puhaltimia ohjataan joko portaittain tai taajuusmuuttajalla pyörimisnopeutta säätäen. Vesijäähdytteisissä ratkaisuissa lauhdutus voi tapahtua moniputki- tai levy-lämmönsiirtimessä, ja lämpö siirretään edelleen jäähdytystorniin tai hyödynnetään muussa prosessissa. Lauhtumislämpötilaa ohjataan lauhtumispaineella ja olosuhteiden mukaan. Jos lämmönlouvuus heikkenee esimerkiksi lämmönsiirtopinnan likaantumisen vuoksi, paine ja lämpötila nousevat ja ohjaus reagoi tähän. (Kuusisto 2021, 13–14; Elo 2023, 20–21.)

Paisuntalaitteen tehtävä on ylläpitää paine-eroa lauhduttimen ja höyrystimen välillä ja annostella kylmäainetta höyrystimeen siten, että tulistus pysyy tavoitetasolla. Vaihtoehtoja ovat kapillaariputki (kiinteä kuristus), käsisäätöventtiili, mekaaninen paisuntaventtiili (TEV) sekä elektroninen paisuntaventtiili (EEV). TEV säätää kylmäaineen syöttöä höyrystimen jälkeisen tulistuksen mukaan ja edellyttää usein ulkoisen paineentasauslinjan, kun painehäviö on suuri. EEV käyttää lämpötila- ja paineantureita sekä säätölogiikkaa, ja mahdollistaa pienimmän vakaan ylikuumeneman hakemisen energiatehokkaasti. (Kuusisto 2021, 14–16; Elo 2023, 21–23.)

Höyrystimet voidaan jakaa kuiva- ja märkätyyppeihin. Kuivahöyrystimessä kylmäaine poistuu tulistuneena, mikä helpottaa öljynpalautusta ja kompressorin suojausta. Märkäratkaisussa putkisto on upotettu kylmäaineeseen ja lämmönsiirto on tehokas, mutta kaasuneste-erotus ja öljynhallinta vaativat eri-

tyishuomion. Kostealle ilmalle alttiissa höyrystimissä huomioidaan kuuran muodostuminen ja sulatus-tarve, kun taas nestehöyrystimillä (vettä/glykolia jäähdyttävät moniputki- tai levysiirtimet) saavutetaan kompaktius ja hyvä lämmönsiirto. (Kuusisto 2021, 17–18.)

2.3 Yleisimmät kylmäaineet ja niiden ominaisuudet

Kylmäaineiden valintaan vaikuttavat ennen kaikkea ympäristövaikutukset, turvallisuusluokitus sekä termodynaamiset ominaisuudet (kuten paine- ja lämpötilatasot, lämpötilaliukuma, lämmönsiirto-ominaisuudet). ISO 817 -standardin mukaisesti kylmäaineet luokitellaan myrkyllisyyden (A = ei luokitella myrkylliseksi, B = myrkyllinen) ja syttyvyyden (1, 2 L, 2, 3) perusteella, joten syntyvät yhdistelmät kuten A1, A2L, A3. (A/B + 1/ 2 L/2/3). EN 378 -standardi puolestaan kytkee tähän täytösmäärien ja sijoituspaikan vaatimukset (pääsilyluokat, sijaintiluokat), joita käytetään käytännön mitoituksessa ja riskienhallinnassa esim. A2L-aineille on usein suuremmat sallitut täytöt kuin A3-aineille oleskelutiloissa tietyin ehdoin. (Ozone 2018, 5; SFS-EN 378.)

Kylmäaineen ympäristömittareista tärkeimmät ovat ODP eli otsonikatopotentiaali ja GWP eli ilmas-tonlämmityspotentiaali hiilidioksidiin verrattuna. Nykyiset HFC/HFO- ja luonnolliset kylmäaineet ovat pääosin ODP=0 eli ne eivät tuhoa otsonikerrosta lainkaan. GWP (global warming potential) mit-taa lämmitysvaikutusta hiilidioksidiin (CO₂) verrattuna (CO₂:lle GWP=1). Lämpöpumppujen ja kylmä-koneikkojen kylmäainevalinnoissa trendi on siirtyä matalan GWP:n vaihtoehtoihin, mitä ohjataan myös niin kutsutun F-kaasusääntelyn avulla. (ISO 817.)

Seoskylmäaineiden käyttäytymisessä voi olla niin sanottua lämpötilaliukumaa. Kylmäaineseokset jae-taan faasinmuutoskäyttäytymisen mukaan atseotrooppisiin (jotakuinkin vakio­lämpötilassa tapahtuva faasimuutos) ja tseotrooppisiin (liukuma). Esimerkiksi R410A on lähes atseotrooppinen (erittäin pieni liukuma), kun taas R407C on tseotrooppinen ja sen tyypillinen lämpötilaliukuma on 3,5–7,5 °C. Liu-kuma kasvaa paineen laskiessa ja se on huomioitava lämmönvaihtimien ja säätölaitteiden mitoituk-sessa. (Jian Sun 2025.)

On huomattava, että A2L-aineet ovat lievästi syttyviä. Niiden palonopeus ja minimisyttymisenergia ovat selvästi A3-aineita matalammalla riskitasolla. Tästä syystä A2L on erotettu omaksi luokakseen, ja käyttö yleistyy uusissa lämpöpumpuissa ja jäähdytyslaitteissa, kun suunnittelu ja komponentit täyttävät standardit. (ISO 817.)

Ylikriittisellä CO₂-prosessilla lämmönluovutus on liukuvaa, jolloin ohjaus optimoi kaasunjäähdyttimen paineen/lämpötilan hyötysuhteen maksimoimiseksi. (Räisä 2013, 14–19; Jokinen 2024, 20–24; Mor-sari 2025, 31–35.)

2.4 Käyttökohteet

Rakennuksissa lämpöpumppuja hyödynnetään lämmitykseen, jäähdytykseen ja lämpimän käyttöveden tuotantoon. Lämmityskäytössä korkea hyötysuhde saavutetaan, kun menoveden lämpötilan tavoitetaso voidaan pitää matalana (esim. lattialämmitys tai matalalämpöinen patteriverkko), joten lauhdutus lämpötilaa ei tarvitse nostaa tarpeettomasti. Jäähdytyskäytössä ”hyöty” otetaan höyrystimen puolelta ja tuotetaan viileää kiertovettä puhallinkonvektoreille tai ilmastointikoneen jälkijäähdytykseen. (Elo 2023, 20–22; Kuusisto 2021, 13–14.) Ilma–vesi- ja ilma–ilmaratkaisuissa sulatusjaksojen hallinta vaikuttaa kausihyötysuhteeseen erityisesti nollan alapuolella (Kontio 2020, 15–16).

Pientaloissa ja pienissä asuinrakennuksissa yleistyneitä ovat ilma–vesi- ja maalämpöpumput. Poistoilmalämpöpumppu voi kattaa käyttöveden ja osan lämmityksestä hyödyntämällä poistoilman lämpöä (Perälä 2009, 36; 80; Kraft 2024, 18–21). Maalämmössä tasaisempi lähdelämpötila tukee osakuorimatehokkuutta läpi vuoden (Jian Sun 2025).

Keskisuurissa ja suurissa kiinteistöissä kylmäkoneikot tuottavat jäähdytysenergiaa puhallinkonvektoreille ja ilmastointikoneille. Ilmajäähdytteisissä koneikoissa lauhdutuksen kellutus (floating head/condensing) pienentää puristussuhdetta leudoissa oloissa, vesijäähdytteisissä järjestelmissä hyödynnetään jäähdytystorneja tai vapaajäähdytystä (ulkoilma) silloin, kun olosuhteet sen sallivat. Kokonaisenergiankäyttöön vaikuttavat myös pumppujen ja puhaltimien taajuusohjaukset sekä lämmön talteenoton (LTO) ratkaisut. (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–18.)

Teollisuudessa vaatimukset kohdistuvat usein tarkkoihin lämpötiloihin, suuriin tehoihin ja jatkuvaan käyttöön. Tämän vuoksi käytetään yleisesti ammoniakkaa (R717) ja CO₂:ta (R744), joilla saavutetaan hyvä hyötysuhde ja laaja toimintakenttä oikeilla prosessiratkaisuilla. CO₂-järjestelmät toimivat usein

transkriittisesti eli kriittisen paineen yläpuolella, joten ohjauksen tehtävä on optimoida kaasunjäähdyttimen paine/lämpötila hyötysuhteen maksimoimiseksi, kun taas ammoniakkijärjestelmissä painopiste on tehokkaissa lämmönsiirroissa ja turvallisuusratkaisuissa. (Rautiainen 2023.)

Kohteissa, joissa on yhtä aikaa jäähdytys- ja lämmitystarpeita (esim. ruokakaupat, uimahallit, monitoimirakennukset), lämmön talteenotto ja lämpöpumppuchillerit (chilleri, joka tuottaa jäähdytyksen ohella hyödynnettävää lauhdelämpöä) mahdollistavat lauhdelämmön hyödyntämisen käyttöveden tai lämmityksen esilämmitykseen. Tällöin ohjauksen on priorisoitava, mihin lämpö ja kylmä ohjataan kulloinkin kokonaishyötysuhteen kannalta edullisimmin. (Jokinen 2024, 22–24; Elo 2023, 21–23.)

3 OHJAUSJÄRJESTELMÄT

Ohjauksella tarkoitetaan tässä työssä sekä laitteen omaa säätöä (valmistajan ohjain kompressoreille, paisuntalaitteelle, puhaltimille ja pumpuille sekä suoja- ja raja-arvoille) että rakennusautomaation (BMS/SCADA) toimintaa, joka kokoaa mittaukset, asettaa aikataulut ja optimoinnit sekä valvoo hälytyksiä. Ohjauksen perimmäinen tavoite on pitää prosessin suureet, kuten lämpötilat, paineet, virtaamat sekä ylikuumenema ja alijäähdytys halutuissa rajoissa mahdollisimman pienellä energiankulutuksella ja kuitenkin vaarantamatta käyttövarmuutta tai laitteiston elinkaarta (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–16). Energiankäyttö kytkeytyy suoraan puristussuhteeseen, joten ohjauksella pyritään tilanteen salliessa pienentämään lauhdutuksen tasoa ja nostamaan höyrystymislämpötilaa. Osakuormalla eli valtaosalla käyttöajasta, invertteri-säätö ja harkittu portaisuus vähentävät käynnistys–pysäytyshäviöitä ja pumppujen sekä puhaltimien taajuusohjaus pienentää siirtotyötä. Lisäksi asetusarvojen dynaaminen resetointi (esim. lämmityskäyrän tai kylmäveden lämpötilan mukautus ulko- ja sisäolosuhteisiin) parantaa kausihyötysuhdetta. Ilmalähteissä ohjauksen olennainen osa on sulatuksen toteutus: tarveperusteinen sulatus vähentää turhia jaksoja verrattuna ajastettuun ja parantaa SCOP:ia, kun anturointi ja logiikka toimivat. (Kontio 2020, 15–16; Elo 2023, 21–22.)

Luotettava ohjaus edellyttää riittävää ja oikein sijoitettua anturointia. Vähintään meno- ja paluulämpötilat, ulkolämpötila, lauhdutin- ja höyrystinpuolen keskeiset lämpötilat, imu- ja purkauspaineet, virtaamat sekä kompressorin, pumppujen ja puhaltimien sähkötehot. Mittauspaikat ja kalibrointi vaikuttavat suoraan säätöjen laatuun (esim. ylikuumeneman mittaus EEV/TEV-säätöä varten). Rakennuskohteissa 1–5 minuutin trenditaajuus on yleensä riittävä analytiikkaan ja poikkeamien tunnistukseen, BMS hoitaa datan tallennuksen, raportoinnin ja hälytykset sekä mahdollistaa etävalvonnan (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 14–18). Käyttöön otossa asetetaan konservatiiviset perusasetusarvot ääriolosuhteisiin, aktivoidaan resetointi ja lauhdutuksen kellutus selkeillä rajoilla (öljynpaluu, puhaltimien vähimmäisnopeus, jäätymissuoja), säädetään ylikuumenema ja alijäähdytys vakaiksi sekä varmistetaan suoja- ja raja-arvot (HP/LP, jäätymissuoja, minimi käynti-/lepoajat). Näiden jälkeen trendejä seuraamalla hienosäädetään parametreja. Jos laitteisto jaksottaa kasvatetaan viiveitä tai optimoidaan portaisuus. Jos lauhdutus pysyy turhan korkeana leudolla säällä, tarkistetaan kellutuksen minimi ja jos ylikuumenema heilahtelee, tarkistetaan anturi ja EEV-parametrit. (Kuusisto 2021, 15–16; Elo 2023, 22–23; Kontio 2020, 15–16.)

3.1 Ohjauksen perusteet ja tavoitteet

Tässä työssä ohjauksella tarkoitetaan sekä laitetason säätöä (valmistajan ohjain kompressorille, paisuntalaitteelle, puhaltimille ja pumpuille sekä suoja- ja raja-arvoille) että rakennusautomaatiota (BMS/SCADA), joka kokoaa mittaukset, toteuttaa optimoinnit ja huolehtii hälytyksistä. Ohjauksen perimmäinen tavoite on pitää prosessisuureet lämpötilat, paineet, virtaamat sekä ylikuumenema ja alijäähdytys halutuissa rajoissa mahdollisimman pienellä energiankulutuksella ja ilman, että käyttövarmuus kärsii. (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–16.)

Energiatalouden kannalta keskeistä on puristussuhteen pienentäminen. Lauhdutuksen tavoitetasoa alennetaan ja höyrystyksen tasoa nostetaan silloin, kun olosuhteet ja laitteiston rajoitteet sen sallivat. Käytännössä tämä tarkoittaa lauhdutuksen “kellutusta” ja menoveden asetusarvojen dynaamista säätöä, kuitenkin öljynpaluuvaatimukset, puhaltimien minimi-ilmavirrat ja jäätymisrajat huomioiden. (Elo 2023, 21–22; Kuusisto 2021, 13–14.)

Koska suurin osa käyttöajasta kuluu osakuormalla, kuorman hallinta on ratkaiseva kausihyötysuhteessa. Invertteri kompressori ja taajuusohjatut pumput pitävät suuret lähellä tavoitetta ja vähentävät käynnistys–pysäytyshäviöitä, monikompressorikoneikoissa yhdistetään usein yksi invertteri ja yksi on/off-kone parhaaksi hetkelliseksi kombinaatioksi (Kuusisto 2021, 13–15). Asetusarvojen dynaaminen resetointi (esim. ulkolämpötilaan sidottu lämmityskäyrä tai kuormaan sidottu kylmaveden lämpötila) parantaa COP/EER-arvoja, kun tehoa tuotetaan vain tarpeeseen (Elo 2023, 20–22).

Ilmalähteissä ohjauksen olennainen osa on sulatuksen toteutus. Ajastettu sulatus on toimintavarma, mutta käynnistyy usein turhaan. Tarveperusteinen (antureihin perustuva) sulatus vähentää sulatusjaksojen määrää ja kestoja sekä parantaa kausihyötysuhdetta. Sulatusjakson aikana kompressorin ottoteho ei tuota hyötylämpöä, mikä heikentää hetkellistä COP:ia siksi laukeamiskriteerien ja palautusehtojen optimointi on tärkeää (Kontio 2020, 15–16).

Luotettava ohjaus edellyttää riittävää ja oikein sijoitettua anturointia. Vähintään meno- ja paluulämpötilat, lauhdutin- ja höyrystinpuolen keskeiset lämpötilat, imu- ja purkauspaineet, virtaamat sekä kompressorin, pumppujen ja puhaltimien sähkötehot. Mittauspaikat ja kalibrointi vaikuttavat suoraan säätöjen laatuun esimerkiksi ylikuumeneman mittaus väärässä kohdassa johtaa EEV/TEV-säätöön, joka ei vastaa todellista tilannetta. (Kuusisto 2021, 14–16; Elo 2023, 22–23.)

Suoja- ja raja-arvot ovat osa perusarkkitehtuuria HP/LP-painesuojat, minimikäynti- ja lepoajat, jäätymissuojat sekä öljynpaluuvaatimukset estävät vauriot ja rajaavat optimoinnin käyttöikkunaa (Kuusisto 2021, 15–16). Käyttöönnotossa asetetaan konservatiiviset perussetpointit ääriolosuhteiden varalle, aktiivoidaan resetointi ja lauhdutuksen kellutus selkeillä rajoilla, säädetään ylikuumenema/alijäähdytys vakaiksi ja varmistetaan trenditalennus (tyypillisesti 1–5 min) analytiikkaa ja poikkeamien tunnistusta varten (Elo 2023, 22–23).

Seurannassa käytetään selkeitä KPI-mittareita COP/EER ja kausitasolla SCOP/SEER, kompressorin käyntitunnit ja käynnistyskerrat, sulatusten määrä ja kesto sekä pumppujen keskimääräinen taajuus kuvaavat ohjauksen laatua ja mahdollistavat hienosäädön (Kontio 2020, 15–16; Elo 2023, 22–23). Tyypillisiä parannuskohteita ovat liian korkea lauhdutustaso leudolla säällä (korjataan kellutuksen raja-arvoilla ja puhaltimien mininopeuksilla), heiluva ylikuumenema (anturin paikka/kalibrointi ja EEV-parametrit) sekä tiheä käyntijaksotus (lisätään viiveitä, optimoidaan portaisuus tai kasvatetaan pusku-ria). (Kuusisto 2021, 14–16; Elo 2023, 22–23.)

3.2 Perinteiset ohjausratkaisut

Perinteisillä ohjausratkaisuilla tarkoitetaan tässä: on/off-portaistusta ja kiinteitä asetusarvoja (hystereesi/differenssi), joilla kompressoreita, puhaltimia ja mahdollisesti kierto-vesipumppuja kytketään päälle ja pois kuorman mukaan. Tyypillisessä toteutuksessa laitteella on vakio lauhdutuksen tavoite (tai vakio kylmäveden/menoveden asetusarvo) ja kiinteä hystereesi, jonka ylitys käynnistää kompressorin ja alitus pysäyttää sen. Menettely on yksinkertainen ja toimintavarma, mutta osakuormalla se johtaa usein käyntijaksotukseen (short cycling), mekaaniseen rasitukseen ja sähköhäviöihin, koska säätö ei hyödynnä leutojen olosuhteiden tuomaa mahdollisuutta laskea lauhdutusta tai nostaa höyrystystä. On/off-portaistus toimii parhaiten tasaisilla kuormilla tai silloin, kun järjestelmässä on riittävä puskuri (vesivaraaja/jäähdytysvara), joka pidentää käyntijaksoja ja vakauttaa paluu-/menolämpötilat. (Kuusisto 2021, 13–15.)

Monikompressorikoneikoissa perinteinen ohjaus toteutetaan porrastamalla kompressoreita (1 → 2 → 3 ...). Portaita kytketään päälle, kun mitattu suure (esim. kylmävesi/menovesi, imupaine) ylittää asetetun rajan, ja pois, kun alittaa toisen rajan. Portaisuus vähentää yksittäisen kompressorin jaksotusta, mutta ilman invertterisäätöä askelten väli voi silti jäädä suureksi, joten lämpötilat sahaavat hystereesisalueella. Tästä seuraa epästabiliutta, jota hillitään minimi käynti- ja lepoajoilla sekä porraskohtaisilla viiveillä, mutta energiankulutus pysyy silti korkeampana kuin olosuhdepohjaisesti kellutetuilla asetusarvoilla. (Kuusisto 2021, 13–16.)

Perinteisissä ilmajäähdytteisissä lauhduttimissa puhaltimet toimivat usein yhdellä tai muutamalla nopeudella (on/off-porrastus). Ohjaussignaali on tyypillisesti lauhtumispaineeseen tai lauhduttimen lämpötilaan kytketty. Kun paine nousee yli rajan, puhallin kytkeytyy päälle ja kun paine laskee riittävästi, puhallin pysähtyy. Tämä pitää prosessin raja-arvoissa, mutta johtaa osakuormalla toistuviin päälle/poissykleihin ja turhaan puhallustyöhön, koska nopeutta ei sopeuteta jatkuvasti kuormaan ja ulkoilmaan. Vastaavasti vesijäähdytteisissä ratkaisuissa perinteinen ohjaus ylläpitää vakioista lauhdutusveden lämpötilaa ja ohjaa jäähdytystornia kiinteillä arvoilla, mikä ei minimoi puristussuhdetta leudoissa oloissa, vaikka toimiikin. (Elo 2023, 20–22.)

Höyrystimen puolella paisuntalaitteena käytetään perinteisesti termostaattista paisuntaventtiiliä (TEV), joka säätää syöttöä tulistuksen perusteella. TEV on rakenteeltaan yksinkertainen eikä tarvitse erillistä ohjainta, mutta sen toiminta-alue on rajallinen, ja herkkyys paine-/lämpötilavaihteluille voi näkyä ylikuumeneman heilumisena osakuormalla. Tämä puolestaan heijastuu lämmönsiirtoon ja kompressorin

imuehtoihin, mikä heikentää hyötysuhdetta verrattuna tarkempaan sähköiseen syöttöön (Kuusisto 2021, 14–16). Perinteisessä ohjauksessa myös pumput ja kiertovedet ovat usein vakiovirtaamia (kiinteä nopeus), joten siirtotyö ei pienene kuorman mukana, mikä näkyy sähkönkulutuksessa etenkin olosuhteissa, joissa tehoa ei tarvita täysimääräisesti (Elo 2023, 22–23).

Ilmalähteisissä lämpöpumpuissa sulatus toteutetaan perinteisesti ajastettuna. Sulatus käynnistyy ennalta määrätyn välein riippumatta todellisesta jään määrästä. Menetelmä on toteutukseltaan selkeä ja varma, mutta se johtaa usein turhiin sulatusjaksoihin, jotka katkaisevat lämmöntuoton 5–15 minuutiksi ja heikentävät hetkellistä COP:ia kausitasolla sulatuksen osuus voi muodostua merkittäväksi, jos alikäyttöisiä sulatuksia kertyy paljon. Tarveperusteinen sulatus on energiatehokkaampi, mutta se kuuluu jo edistyneempiin menetelmiin ja käsitellään erikseen luvussa 3.3. (Kontio 2020, 15–16.)

Perinteisen ohjauksen vahvuus on selkeys ja vähempi määrä parametreja, helppo käyttöönotto ja huolto, laaja yhteensopivuus sekä ennakoitava käytös häiriötilanteissa. Rajoitteet liittyvät nimenomaan osakuormaan ja olosuhteiden vaihteluun. Kiinteät asetusarvot ylläpitävät usein tarpeettoman korkeaa lauhdutusta leudolla säällä ja sallivat liian matalan lämpötilan höyrystyksessä, mikä kasvattaa puristusuhdetta ja kompressorin ottotehoa. Lisäksi puhaltimien/pumppujen on/off-ohjaus kuluttaa turhaan sähköä verrattuna jatkuvaan nopeussäätöön. (Elo 2023, 20–23). Käyttövarmuuden kannalta vähintään HP/LP-painesuojat, minimi käynti-/lepoajat, jäätymissuojat ja riittävä puskurointi ovat perusvaatimuksia, jotta jaksotus ja raja-arvojen sahaus eivät aiheuta hälytyksiä tai ennenaikaista kulumista. (Kuusisto 2021, 15–16.)

3.3 Edistyneet ohjausmenetelmät

Edistyneiden ohjausmenetelmien ydinajatus on, että kompressorin, lauhduttimen, höyrystimen sekä pumppujen ja puhaltimien toimintaa ei pidetä kiinteissä arvoissa, vaan niitä muutetaan olosuhteiden ja kuorman mukaan. Tavoitteena on pienentää puristussuhdetta aina, kun se on turvallisesti mahdollista, vähentää käynti–pysäytyshäviöitä ja minimoida siirtotyö, kuitenkin tinkimättä käyttövarmuudesta. Käytännössä tämä edellyttää sekä laitetaso ohjaimen kyvykkyyttä että rakennusautomaation (BMS) tukea, jotta asetuspisteitä voidaan säätää jatkuvasti ja dataa voidaan käyttää päätöksenteon pohjana. (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–16.)

Portaaton kuormanhallinta toteutetaan yleensä invertterisäädöllä, jossa kompressorin pyörimisnopeus seuraa imupainetta tai menolämpötilaa ja pumput sekä puhaltimet ohjautuvat paine-, virtaus- tai lämpötilaeroon perustuen. Invertteri vakauttaa prosessin paineet ja lämpötilat pysyvät lähellä tavoitetta ilman voimakasta sahausta ja vähentää käynnistys- ja pysäytystappioita, jotka ovat tyypillisiä on/off-porrastuksessa. On kuitenkin tärkeää huomata, että invertterin todellinen hyöty realisoituu vasta, kun asetusarvot eivät ole kiinteitä, vaan “elävät” sään ja kuorman mukana, muuten portaattomuus vain pehmentää säätöä, mutta ei vähennä varsinaista energiantarvetta (Elo 2023, 20–23). Monikompressorikoneikoissa energiatehokas kompromissi on usein yhdistelmä, jossa invertterikompressori kantaa peruskuorman ja on/off-yksikkö täydentää huipun. Samalla käyntitunnit tasataan kompressorien välillä kunnossapidon ja eliniän kannalta. (Kuusisto 2021, 13–15.)

Asetusarvojen dynaaminen resetointi on toinen keskeinen periaate. Lämmityksessä menoveden tavoitetta lasketaan, kun ulkolämpötila nousee tai kun sisäolosuhteet ja venttiilien asennot kertovat kuorman pienentyneen. Jäähdytyksessä taas kylmäveden tavoitetta voidaan nostaa, mikäli tilat pysyvät olosuhterajoissa. Sama koskee lauhdutuksen tasoa sitä ei pidetä vakiona, vaan lauhdutuksen kellutuksella annetaan lauhdutuspainetason laskea leudoissa oloissa niin pitkälle kuin laitteiston rajat sallivat. Näitä rajoja ovat esimerkiksi öljynpaluu, puhaltimien minimi-ilmavirta ja jäätymisriskit. Kun lauhdutusta voidaan pudottaa, puristussuhde pienenee ja kompressorin ottoteho laskee sen mukaisesti. Vesijäähdytteisissä koneikoissa analoginen hyöty saadaan madaltamalla lauhdutusveden tavoitetta jäähdytystornin tai vapaajäähdytyksen avulla aina, kun ulko-olosuhteet sen mahdollistavat. (Elo 2023, 21–22; Kuusisto 2021, 13–14.)

Ilmalähteisten järjestelmien energiatehokkuuteen vaikuttaa merkittävästi sulatuksen ohjaus. Ajastettu sulatus on toimintavarma, mutta käynnistyy usein turhaan ja katkaisee lämmöntuotannon useiksi minuuteiksi kerrallaan, mikä heikentää hetkellistä COP:ia. Tarveperusteinen sulatus hyödyntää antureita esimerkiksi paine- ja lämpötilaeroa tai erillistä jääanturia ja käynnistyy vasta, kun jään muodostumisesta on selvä näyttö. Myös katkaisuperuste määritetään sensorien avulla, jolloin sulatus päättyy heti kun lämmönsiirtimen pinta on puhdistunut. Tuloksena sulatusten lukumäärä ja kesto pienenevät ja kausihyötysuhde paranee. (Kontio 2020, 15–16.)

CO₂-järjestelmissä ohjauksen erityiskysymys on kaasunjäähdyttimen paineen optimointi trans-kriittisessä käytössä. Optimaalinen korkean puolen paine ei ole vakio, vaan riippuu ulkolämpötilasta ja kuormasta, ohjain hakee paineen, jolla kokonaisentalpiamuutos ja sitä kautta hyötysuhde ovat parhaat. Tämä edellyttää luotettavaa anturointia sekä nopeaa, vakaata säätölogiikkaa, koska pienetkin virheet korkeapaineen asettelussa näkyvät välittömästi sähkönkulutuksessa (Morsari 2025, 31–33). Samalla logiikka huolehtii siitä, ettei matalapaine putoa liikaa. Höyrystimen jäätymis- ja virtausrajat muodostavat reunaehdot, joiden puitteissa optimointi tapahtuu.

Siirtolaitteiden optimointi on energiataseen kannalta yllättävän suuri tekijä. Kun pumput ja puhaltimet taajuusohjataan paine- tai lämpötilaeroperusteisesti tai rakennusautomaation “eniten auki olevan venttiilin” logiikalla niiden nopeus alenee automaattisesti osakuormalla ja sähköteho pienenee epälineaarisesti nopeuden mukana. Tämä pienentää siirtotyötä ilman, että mukavuus tai prosessin stabiilius heikkenee. Vaikutus on erityisen näkyvä jäähdytyksessä, jossa puhaltimien ja pumppujen osuus kokonaiskulutuksesta voi olla merkittävä, jos niitä ajetaan kiinteällä nopeudella. (Elo 2023, 22–23.)

Kaikki edellä kuvattu edellyttää riittävää anturointia ja huolellista käyttöönottoa. Vähimmäisvaatimuksia ovat oikein sijoitetut lämpötila-anturit (meno, paluu, lauhdutin- ja höyrystinpuoli sekä ulkona), paineanturit imulle ja purkaukselle, virtausmittaukset sekä kompressorin, pumppujen ja puhaltimien sähkötehomittaukset. Esimerkiksi ylikuumeneman mittauspaiikka ratkaisee, toimiiko EEV-säätö oikein – väärä anturitieto johtaa systemaattiseen säätövirheeseen. Perussuojat (HP/LP, minimi käynti- ja lepoajat, jäätymissuojat) rajaavat optimoinnin käyttöikkunan ja estävät vaaratilanteet. Käyttöönotossa on hyvä aloittaa konservatiivisilla rajoilla, kytkeä 1–5 minuutin trendit tallennukseen ja säätää rajat ja käyrät vähitellen datan perusteella. Tyypillisiä hienosäätötoimia ovat lauhdutuksen kellutuksen minimien tarkistus (jos lauhdutustaso jää leudolla säällä tarpeettoman korkeaksi), viiveiden ja porrastuksen hienosäätö sekä EEV-parametrien ja anturoinnin tarkistus. (Kuusisto 2021, 14–16; Elo 2023, 22–23.)

3.4 Tiedonkeruu ja anturitekniikka

Energiatehokas ja luotettava ohjaus edellyttää, että järjestelmästä mitataan oikeat suureet, oikeista paikoista ja riittävällä tarkkuudella. Lämpöpumpun ja kylmäkoneikon kannalta keskeisiä ovat vähintään seuraavat mittaukset. Menon ja paluun lämpötilat lämmitys- tai jäähdytysverkossa, lauhdutin- ja höyrystinpuolen lämpötilat (sisään/ulos tai pinnat), kompressorin imu- ja purkauspaineet, verkostojen virtaamat sekä kompressorin, pumppujen ja puhaltimien sähkötehot. Näiden avulla voidaan laskea hetkellinen hyötysuhde (COP/EER) ja erotella kompressorin sekä siirtolaitteiden osuudet kokonaiskulutuksesta. Mittauksiin liitetään BMS:ssä selkeät tunnisteet ja yksiköt, jotta analytiikka, hälytykset ja raportointi toimivat johdonmukaisesti. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 14–16.)

Anturien sijoittelu on vähintään yhtä tärkeää kuin anturin tarkkuus. Ylikuumeneman laskenta edellyttää höyrystimen jälkeistä, edustavaa lämpötila- ja painetietoa. Väärä mittauspaiikka johtaa systemaattiseen säätövirheeseen, joka näkyy EEV/TEV-syötön heilumisena ja lämmönsiirron heikkenemisenä. Vastaavasti alijäähdytyksen arviointi edellyttää, että lauhduttimen nestelinjan lämpötilaa mitataan ennen paisuntalaitetta ja että painetieto vastaa samaa kohtaa. Verkostopuolella menon ja paluun anturit asennetaan sekoittumisen jälkeen riittävän pitkälle suoran putken osuudelle, jotta paikalliset virtaukset tai osittainen sekoittuminen eivät vääristä mittausta. Virtausmittareiden kohdalla varmistetaan valmistajan edellyttämät suorat osuudet ja ilmanpoisto. Muutoin pienetkin asennusvirheet kumuloituvat energia- ja COP-laskentaan. (Kuusisto 2021, 14–16.)

Näytteenottotaajuus ja datan eheys määrittävät, mitä analyysissä on ylipäättään nähtävissä. Rakennuskohteissa 1–5 minuutin trenditaajuus riittää yleensä ohjauksen seurantaan ja poikkeamien havaitsemiseen. Käyttöön otossa ja vikatilanteissa hyödynnetään tilapäisesti tiheämpää logitusta (esim. 10–30 s) säätöjen hienosäätöä varten. Kaikki pisteet aika-leimataan samalla kellolla ja tallennus tehdään katkeamattomana historianakselina. Puuttuvat arvot merkitään selkeästi eikä niitä täytetä automaattisesti ilman merkintää, jotta analyysit eivät johda harhaan. (Elo 2023, 22–23.) Pisteiden nimeämiskäytäntö ja yksiköt dokumentoidaan. Näin varmistetaan, että myöhemmät muutokset eivät riko raportteja tai hälytysrajoja. (Kuusisto 2021, 17–18.)

Ohjauksen kannalta kriittiset hälytys- ja suoja-arvot kytkeytyvät suoraan antureihin. Painesuojat (HP/LP), jäätymissuojat ja virtausvahdit tarvitsevat luotettavan mittausketjun. Vääriin arvoihin perustuva hälytys voi joko pysäyttää laitteen turhaan tai jättää pysäyttämättä tilanteessa, jossa riski on todellinen. Siksi antureille määritellään säännöllinen kalibrointiväli ja huollossa tarkistetaan paitsi anturin

oma toiminta myös signaaliketju BMS:ään saakka. (Kuusisto 2021, 15–16.) Käyttöönnotossa varmistetaan lisäksi, että trendit keräävät ainakin meno- tai paluulämpötilat, ulkolämpötilan, imu- ja purkauspaineet, kompressorin tehon sekä pumppujen nopeudet. Näiden varassa voidaan todentaa asetusarvojen resetointi, lauhdutuksen kellutus, ylikuumeneman vakaus ja käyntijaksotuksen poistuminen. (Elo 2023, 22–23.)

Ilmalähteisissä järjestelmissä sulatuksen ohjauksen onnistuminen riippuu antureista. Aikaperusteinen sulatus on yksinkertainen, mutta katkoo lämmöntuotantoa myös silloin, kun jäätä ei ole. Tarveperusteinen ohjaus hyödyntää paine- tai lämpötilaeroja (esim. höyrystimen yli) ja erillisiä jääantureita. Tällöin sulatus käynnistyy vasta, kun jään muodostumisesta on näyttö, ja päättyy heti kun lämmönsiirrin on puhdistunut. Tämä näkyy kausitasolla SCOP:n paranemisena, kun “turhien” 5–15 minuutin sulatusjaksojen määrä vähenee. (Kontio 2020, 15–16.) Jotta tarveperusteisuus toimii, myös päättymiskriteerit mitoitetaan oikein. Liian tiukka ehto jättää huurrettä ja heikentää lämmönsiirtoa, liian väljä pidentää sulatusta tarpeettomasti.

Sähköteho- ja energiamittaukset jaetaan mielellään lohkoihin, jotta säästöjen kohdentaminen on läpinäkyvää. Kompressorit, lauhdutinpuhaltimet tai -pumput, höyrystinpiirin puhaltimet/pumput ja mahdolliset oheislaitteet kuuluvat mittauksen piiriin. Tällöin invertteröinnin, lauhdutuksen kellutuksen ja asetusarvojen resetoinnin vaikutus näkyy suoraan oikeassa kulutusosuudessa, eikä pelkkä kokonaiskulutus peitä yksittäisten toimenpiteiden hyötyä. Lämpö- tai kylmäteho arvioidaan virtaus \times lämpötilaero menetelmällä (tai lämpöenergiamittarilla), jolloin voidaan raportoida myös tuotettua hyötyä kohti kulutettu kWh sähköä. (Elo 2023, 22–23.)

Datan laadunvarmistus on osa päivittäistä käyttöä. Hitaasti hiipivät virheet kuten anturin drift, tukkeutuva sihti tai väärin päin asennettu anturi näkyvät ensin trendien avulla. Tulistuman heilunta ilman kuormamuutosta, lauhdutuksen kellutuksenpuuttuminen leudolla säällä tai kompressorin käynnistyskertojen kasvu, vaikka kuorma ei ole muuttunut kertovat kaikki ongelmista ohjauksessa. BMS:n trendeistä voidaan johtaa KPI-mittarit (SCOP/SEER-kausitasolla, hetkellinen COP/EER, käyntitunnit ja -kerrat, sulatusten määrä ja kestoaika, pumppujen/puhaltimien keskimääräinen taajuus), joita seurataan kuukausittain ja joiden avulla hienosäätö priorisoidaan. (Kontio 2020, 15–16; Elo 2023, 22–23.)

3.5 Etävalvonta ja IoT-integraatio

Etävalvonnalla tarkoitetaan tässä sekä rakennusautomaation (BMS/SCADA) keskitettyä seurantaan, että pilvipohjaista analytiikkaa, jossa mittausdataa hyödynnetään jatkuvaan optimointiin ja kunnossapidon tukeen. Laitetason ohjaimet (kompressori, paisuntalaite, puhaltimet/pumput, suojapiirit) vastaavat reaaliaikaisesta säätöstä ja turvarajoista, kun taas BMS kerää mittaukset, hallitsee hälytykset ja tuottaa raportit. IoT-kerros laajentaa tätä mahdollistamalla historiadatan varastoinnin, vertailut ja automaattiset analyysit sekä etäkäyttöliittymät. Keskeistä on, että etävalvonta ei kierrä laitteiden turvasuojia. Paikallinen ohjain säilyy aina viimeisenä auktoriteettina. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 17–18.)

BMS:n arvo syntyy näkyvyydestä ja toistettavuudesta. Yhtenäinen nimeäminen (pistetunnukset ja yksiköt), aikaleimaus ja vakiintunut trenditaajuus (tyypillisesti 1–5 min rakennuskohteissa) varmistavat, että ohjauksen muutosten vaikutuksia voidaan verrata kuukausi ja kausitasolla. Samoilla pistemääritellyillä rakennetaan KPI-mittarit kuten SCOP/SEER, käynnistysmäärät ja ajat, sulatusten määrä/kesto sekä pumppujen ja puhaltimien keskimääräinen taajuus. Näitä mittareita seurataan säännöllisesti ja joiden perusteella hienosäätöä priorisoidaan. (Elo 2023, 22–23.) Kun trendit ovat ehjiä, asetusarvojen resetointi ja lauhdutuksen kellutus voidaan todentaa datasta sen sijaan, että vaikutus jäisi tuntumaksi (Kuusisto 2021, 17–18).

IoT-integraatiossa data viedään pilveen joko suoraan laiteohjaimilta tai BMS:n kautta. Tämä mahdollistaa fault detection & diagnostics (FDD) menettelyt, joissa poikkeamia etsitään automaattisesti sääntöjen ja raja-arvojen avulla. Esimerkiksi jos ulkolämpötilan noustessa lauhdutuksen taso ei laske, järjestelmä ehdottaa kellutusrajojen tarkistamista. Jos ylikuumenema heiluu kuorman pysyessä tasaisena, analytiikka nostaa esiin anturin tai EEV-parametrien mahdollisen virheasennon. Tällaiset digitaaliset tarkistuslistat nopeuttavat vianhakuja ja vähentävät turhia huoltokäyntejä, kun korjaavat toimet voidaan kohdistaa datan perusteella. (Elo 2023, 22–23.)

Hälytykset ja ilmoitukset jäsenellään prioriteetteihin. Korkean prioriteetin raja-arvot (HP/LP-painesuojat, jäätymisriskit, virtauskatkot) johtavat välittömään toimenpiteeseen tai pysäytykseen. Keskitasolla ilmoitetaan esimerkiksi jaksotuksen lisääntymisestä tai lauhdutuksen poikkeuksellisen korkeasta tasosta. Matalalla prioriteetilla raportoidaan trendien epänormaali kehitys (esim. käyntituntien epätasainen jakautuminen kompressorien välillä). Kun jokaiselle hälytykselle on vastuurooli ja vasteaika, etävalvonta tukee arjen käyttöä sen sijaan, että se tuottaisi. (Kuusisto 2021, 17–18.)

Tietoturvassa lähtökohta on kerroksellinen suojaus. Etäyhteydet toteutetaan salattuina ja rajattujen käyttöoikeuksien periaatteella. Hallintaliikenne pidetään erillään käyttäjäverkoista, ja etäkäyttö on suositeltavaa rajata VPN:n taakse. Käyttäjätunnukset ja roolit määritellään niin, että vain valtuutetut henkilöt voivat muuttaa asetusarvoja tai ohjata laitteita; muille riittävät katseluoikeudet. Aikaleimaus ja lukitus mahdollistavat muutosten jäljitettävyyden, ja varmuuskopiot (laitteiden konfiguraatiot, BMS-tietokanta) palauttavat toiminnan häiriötilanteissa. (Kuusisto 2021, 17–18.) Samalla huolehditaan aikasynkronoinnista (NTP), jotta eri lähteistä tulevat trendit ovat vertailukelpoisia (Elo 2023, 22–23).

Käyttöönoton näkökulmasta etävalvonta kannattaa kytkeä mukaan jo käyttöönottovaiheessa. Kun 1–5 minuutin trendit (meno/paluu, ulkolämpötila, imu/purkaus, kompressorin teho, pumppujen/puhaltimien nopeudet) rullaavat heti alusta, ensimmäinen kausi antaa vertailutason myöhemmille optimoinneille. Tämän jälkeen ohjausstrategioita kuten lauhdutuksen kellutusta, menoveden resetoointia tai tarveperusteista sulatusta voidaan tarkentaa datan perusteella ilman, että turvarajoja ylitetään. Käytännössä “pieni ja varovainen” muutos kerrallaan, muutoksen dokumentointi ja vaikutuksen seuranta ovat toimivin etenemismalli. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 17–18.)

Etävalvonnan hyöty konkretisoituu myös ennakoivassa kunnossapidossa. Kun käyntituntien kasautuminen, käynnistyskertojen kasvu tai suodatinpaine-eron hidus nousu havaitaan trendeistä, huolto voidaan kohdistaa ennen kuin ongelma näkyy mukavuudessa tai energiankulutuksessa. Samoin sulatusjaksojen pituuden ja tiheyden muutokset paljastavat anturivikoja tai ohjauksen raja-arvojen ajautumista. (Kontio 2020, 15–16; Elo 2023, 22–23.) Tavoitteena on luoda toistuva kuukausirutiini, jossa KPI-raportti käydään läpi ja päätetään 1–2 konkreettista hienosäätötoimea seuraavalle jaksolle. Näin optimointi pysyy arjen osana.

4 ENERGIATEHOKUUDEN NÄKÖKULMA

Tässä luvussa tarkastellaan lämpöpumppujen ja kylmäkoneikkojen energiatehokkuutta järjestelmätasolla. Tavoitteena on jäsentää, mistä tekijöistä todellinen energiankulutus muodostuu ja millä ohjauskeinoilla siihen voidaan vaikuttaa ilman käyttövarmuuden heikkenemistä. Tarkastelu kytkee yhteen luvussa 2 esitetyn kiertoprosessin ja komponentit sekä luvussa 3 kuvatut ohjausmenetelmät, jotta vaikutus sekä hetkelliseen että kausittaiseen hyötysuhteeseen tulee näkyväksi.

Energiatehokkuus ymmärretään tässä kokonaisuutena, jossa huomioidaan sekä kompressorin että apulaitteiden (pumput, puhaltimet, oheislaitteet) sähkönkulutus. Hetkellistä suorituskkyä kuvaavat COP (lämmitys) ja EER (jäähdytys), kun taas SCOP/SEER mittaavat suorituskkyä vuoden yli vaihtelevilla osakuormilla ja ulko-olosuhteilla standardien EN 14511 ja EN 14825 periaatteiden mukaisesti. Näiden mittareiden avulla voidaan vertailla ohjauksen muutosten vaikutusta riippumatta yksittäisen kohteen kuormituksen vaihtelusta. (SFS-EN 14511.)

Luvun läpi kulkeva perusajatus on, että energiankulutus määräytyy ennen kaikkea puristussuhteen (lauhdutus- ja höyrystyslämpötilat), kuormaprofiilin (osakuorman osuus) ja ohjauksen yhteisvaikutuksesta. Kun lauhdutusta voidaan kelluttaa leudoissa oloissa, höyrystystä nostaa rajoissa, apulaitteet ajavat nopeussäädöllä ja ilmalähteisissä järjestelmissä siirtyä tarveperusteiseen sulatukseen, pienenevät sekä kompressorin ottoteho että siirtotyö ja tämä näkyy suoraan COP/EER- sekä SCOP/SEER-arvoissa. (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–18; Kontio 2020, 15–16.)

Koska työ toteutetaan kirjallisuustutkimuksena, vaikutuksia arvioidaan aiemman tutkimus- ja ohjemaateriaalin perusteella. Tuloksia tulkitaan ensisijaisesti suhteellisina muutoksina (esim. ΔCOP , $\Delta\text{kWh } \%$) ja mahdollisuuksien mukaan suhteessa standardoituihin testipisteisiin. Luvun lopussa nostetaan käytännön KPI-mittarit ja seurantatapa, joilla energiatehokkuutta voidaan valvoa ja ylläpitää arjessa. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 17–18.)

4.1 Energiatohokkuuden määritelmä ja merkitys

Tässä työssä energiatohokkuus ymmärretään järjestelmätason ominaisuutena. Tarkastelun kohteena on koko lämpöpumppu- tai kylmäkoneikkokokonaisuus apulaitteineen (pumput, puhaltimet, ohjaus ja mahdolliset sähköiset lisälämmittimet) pelkän kompressorin sijaan. Hetkellinen suorituskyky ilmaistaan lämmityksessä COP-arvolla (Coefficient of Performance) ja jäähdytyksessä EER-arvolla (Energy Efficiency Ratio), jotka määritellään yksinkertaisesti tuotetun hyötytehon ja sähkötehon suhteena:

$$\text{COP} = Q_{\text{lämpö}}/W_{\text{sähkö}} \text{ ja } \text{EER} = Q_{\text{jäähdytys}}/W_{\text{sähkö}}.$$

Koska rakennukset ja prosessit toimivat vaihtelevissa ulko-olosuhteissa ja lähes aina osakuormalla, todellisen suorituskyvyn kuvaamiseen käytetään kausimittareita SCOP ja SEER, joissa huomioidaan kuormitusprofiilit ja ilmasto (SFS-EN 14825). Hetkellisten testipisteiden ja mittausten menetelmien yhtenäisyys määritellään standardissa EN 14511, jotta laitteita voidaan vertailla keskenään samoin perustein (SFS-EN 14511).

Käytännön energiankulutus määräytyy kolmen tekijän yhteisvaikutuksesta. Ensimmäinen puristussuhde eli lauhdutuksen ja höyrystyksen välinen paineen- ja lämpötilannosto. Mitä pienempi nosto, sitä vähemmän sähköä tarvitaan saman lämpö- tai jäähdytysenergian tuottamiseen. Toiseksi tärkein tekijä on kuormaprofiili, jossa usein suurin osa käyttöajasta kuluu osakuormalla. Tällöin kuormansäätö (invertterikompressori, pumppujen/puhaltimien taajuusohjaus) ratkaisee, kuinka paljon käynnistys-pysäytyshäviöitä syntyy ja kuinka matalilla asetusarvoilla voidaan ajaa. Kolmanneksi tärkein on ohjausstrategia, jossa dynaamisesti elävät asetusarvot (menoveden tai kylmäveden resetointi, lauhdutuksen kellutus) ja tarveperusteinen sulatus pitävät puristussuhteen ja siirtotyön mahdollisimman pieninä ilman, että käyttövarmuus vaarantuu. (Elo 2023, 20–23; Kuusisto 2021, 13–16; Kontio 2020, 15–16.)

Energiatohokkuutta analysoitaessa on tärkeää erottaa komponentti-COP (kompressorin suhdeluku valmistajan testipisteessä) ja järjestelmä-COP, johon lasketaan mukaan apulaitteiden kulutus. Jälkimmäinen kuvaa todellista energiataloutta ja on siten mielekkäämpi kohteen käyttöä ja optimointia varten. Esimerkiksi laitteisto voi saavuttaa korkean COP-luvun testissä, mutta jos sitä ajetaan kiinteällä lauhdutuksen setpointilla leudolla säällä tai kiinteällä pumppunopeudella, järjestelmä-COP jää matalaksi, koska kompressorin ja siirtolaitteiden yhteenlaskettu sähköteho kasvaa tarpeettomasti. (Elo 2023, 22–23.)

Lämmityskohteissa lämmönjaon lämpötilataso on keskeinen. Matalalämpöinen lattialämmitys tai suuripinta-alaiset lämmönluovuttimet mahdollistavat alhaisemman menolämpötilan ja siten paremman

COP:n. Jäähdytyksessä vastaava hyöty saavutetaan, kun sisäolosuhde voidaan pitää mukavana korkeammalla kylmäveden lämpötilalla (esim. 14–17 °C 7–12 °C:n sijaan), jolloin höyrystyslämpötila nousee ja puristussuhde pienenee. Ilmalähteissä sulatusstrategia vaikuttaa suoraan kausihyötysuhteeseen. Ajastettu sulatus aiheuttaa helposti 5–15 minuutin jaksoja, joiden aikana kompressorin työ ei tuota hyötylämpöä, kun taas tarveperusteinen sulatus vähentää turhia jaksoja ja näkyy suoraan SCOPissa. (Kontio 2020, 15–16.)

Organisaatiotasolla energiatehokkuus on muutakin kuin tekniikkaa. Se on operatiivinen toimintamalli. BMS/IoT-ympäristössä seurattavat tunnusluvut, kuten SCOP/SEER, kompressorin käynnistyskerrat ja käyntitunnit, sulatusten määrä ja kesto, pumppujen/puhaltimien keskimääräinen taajuus kertovat, toimiiko ohjaus niin kuin on suunniteltu vai ovatko setpointit ajautuneet. Säännöllinen (esim. kuukausittainen) KPI-katselmus ja pienten, dokumentoitujen säätöjen tekeminen varmistavat säästövaikutusten saamisen läpi elinkaaren. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 17–18.)

4.2 COP- ja EER-arvot sekä niiden optimointi

Tässä työssä hetkellistä suorituskykyä kuvataan lämmitystilassa COP-arvolla (Coefficient of Performance) ja jäähdytyksessä EER-arvolla (Energy Efficiency Ratio). Molemmat määritellään tuotetun hyötytehon ja käytetyn sähkötehon suhteena. Jotta lukemat kuvaisivat todellista energiataloutta, nimitäjään lasketaan kompressorin lisäksi myös pumppujen ja puhaltimien kulutus näin saadaan järjestelmätason COP/EER pelkän kompressorin oma tehokkuusluvun sijaan (Elo 2023, 22–23). Vertailtavuuden varmistava standardi EN 14511 määrittelee testipisteet ja mittaustavan (esim. A7/W35 tai W10/W35), ja kausitasolla standardi EN 14825 asettaa periaatteet SCOP/SEER-laskennalle, jossa huomioidaan osakuormat ja eri ilmastot. (SFS-EN 14511; SFS-EN 14825.)

Se, millaiseksi COP/EER kullakin ajanhetkellä muodostuu, riippuu ensisijaisesti kolmesta asiasta. Ensimmäinen on puristussuhde, siis lauhdutuksen ja höyrystyksen välinen lämpötilanosto. Mitä pienempi nosto, sitä vähemmän sähköä tarvitaan saman lämpö- tai jäähdytysenergian tuottamiseen. Toinen on lämmönsiirron laatu eli lähestymislämpötilat lämmönvaihtimissa sekä ylikuumeneman ja alijäähdytyksen tasot. Liian suuri ylikuumenema heikentää höyrystimen käyttöastetta, kun taas liian pieni kasvattaa nestelyönnin eli nesteen kompressoriin päätyminen riskiä. Molemmat näkyvät suoraan hyötysuhteessa (Kuusisto 2021, 14–16). Kolmas tekijä on apulaitteiden siirtotyö. Pumppujen ja puhaltimien sähköteho korostuu juuri osakuormalla, jossa järjestelmä toimii suurimman osan käyttöajastaan (Elo 2023, 22–

23). Ilmalähteissä tähän kytkeytyy vielä sulatuksen vaikutus. Ajustetut, tarpeettomat sulatusjaksot heikentävät hetkellistä COP:ia ja kasaantuvat kausitasolla tuntuvaksi häviöksi (Kontio 2020, 15–16).

Optimointi kohdistuu siis selvästi samoihin vipuihin. Lauhdutuksen kellutuksella (floating head/condensing) lauhdutuspainetta ja -lämpötilaa lasketaan aina, kun olosuhteet sen sallivat, kuitenkin öljynpaluu-, minimi-ilmavirta- ja jäätymisrajat selvästi määriteltävinä. Höyrystyslämpötilan nosto toteutuu käytännössä siten, että jäädytyksessä sallitaan korkeampi kylmäveden tavoite ja lämmityksessä pyritään matalampaan menoveteen usein se edellyttää suurempaa lämmönluovutinpintaa tai lämmityskäyrän huolellista määrittelyä. Jotta puristussuhdetta ei kasvateta turhaan leudoissa oloissa, asetusarvot tehdään dynaamisiksi menoveden, kylmäveden ja lauhdutuksen setpointit “elävät” ulko- ja sisäolosuhteiden sekä kuorman mukaan sen sijaan, että ne olisivat vakioita ympäri vuoden. (Elo 2023, 20–22.)

Osakuormalla ratkaisevaksi nousee kuormansäätö. Invertterikompressori pitää paine- ja lämpötasot lähellä tavoitetta ilman jaksotusta. Monikompressorikoneikossa tyypillinen energiatehokas ratkaisu on antaa invertterin kantaa peruskuorma ja täydentää huiput on/off-yksiköllä, samalla kun käyntitunnit tasataan kompressorien kesken (Kuusisto 2021, 13–15). Samassa hengessä pumput ja puhaltimet ohjataan taajuudella paine-, virtaus- tai ΔT -perusteisesti.

Käytännön etenemismalli on varovainen ja todennettava. Ensin varmistetaan suojat ja perusmitoitus (HP/LP, jäätymissuojat, minimi käynti-/lepoajat), kytketään 1–5 minuutin trendit ja dokumentoidaan lähtötaso. Tämän jälkeen aktivoidaan resetointi ja lauhdutuksen kellutus konservatiivisilla minimeillä, säädetään invertterit kantamaan osakuorma ja siirrytään ilmalähteissä sulatukseen. Vaikutukset todennetaan kuukausittain KPI-mittareilla. Hetkellinen COP/EER, kausitasolla SCOP/SEER, kompressorin käynnistyskerrat ja tunnit, sulatusten määrä ja kesto sekä pumppujen ja puhaltimien keskimääräinen taajuus. (Elo 2023, 22–23; Kuusisto 2021, 17–18; Kontio 2020, 15–16.)

4.3 Lämpöenergian talteenotto ja hyödyntäminen

Lämpöpumpun tai kylmäkoneikon sähkönkulutus tietyn aikavälin aikana on ajan mukaan integroituna kompressorin sekä apulaitteiden ottotehojen summa. Säädön valinnoilla vaikutetaan jokaiseen termiin erikseen. Kompressorin teho määräytyy pääosin puristussuhteesta (lauhdutuksen ja höyrystyksen välinen lämpötilanosto), kun taas apulaitteiden teho riippuu siirtotyöstä eli virtaus- ja painevaatimuksista.

Kiinteät setpointit ja on/off-käynti pitävät laitteiston usein turhan kovalla tasolla leudoissa oloissa, jolloin sekä puristussuhde että siirtotyö kasvavat. Dynaamiset setpointit, lauhtuksen kellutus ja invertterisäädöt puolestaan pienentävät näitä tekijöitä ilman, että olosuhterajoista tingitään. (Elo 2023, 20–23.)

Konkreettisesti lauhtuksen kellutus näkyy kompressorin sähkökulutuksessa. Kun lauhtuspaine/–lämpötilaa lasketaan aina, kun ulko-olosuhteet sen sallivat, puristussuhde pienenee ja kompressorin ottoteho laskee. Vastaavasti höyrystyslämpötilatason nosto (esim. sallimalla jäähtyöksessä hie-man lämpimämpi kylmävesi tai mitoittamalla lämmitykseen matalalämpöinen lämmönjako) pienentää paineen ja samalla lämpötilanostoa lähtötason nousun myötä. Nämä muutokset toteutetaan turvallisilla rajoilla (öljynpaluu, minimi-ilmavirta/kierrosluku, jäätymissuoja), mutta jo asetusmuutokset leudoissa oloissa vaikuttavat kulutukseen selvästi, koska järjestelmä toimii valtaosan ajasta osakuormalla. (Elo 2023, 21–22; Kuusisto 2021, 13–14.)

Osakuormalla korostuu kuormanhallinta. On/off-portaistus johtaa usein käyntijaksotukseen, joka lisää käynnistys–pysäytyshäviöitä ja rasittaa laitteistoa mekaanisesti. Invertterikompressori tasaa paine- ja lämpötasot lähelle tavoitetta ilman sahausta. Monikompressorikoneikoissa energiatehokas käytäntö on antaa invertterin kantaa peruskuorma ja täydentää huiput on/off-yksiköllä, samalla kun käyntitunnit tasataan kompressorien kesken (Kuusisto 2021, 13–15). Kun tähän yhdistetään asetusarvojen resetointi (lämmityksessä menoveden, jäähtyöksessä kylmäveden tavoite sekä lauhtuslämpötila elävät ulko- ja sisäolosuhteiden mukaan), poistuvat “yliturvalliset” lämpötilaerot, jotka muuten nostaisivat puristussuhdetta turhaan (Elo 2023, 20–22).

Säädön vaikutus näkyy myös siirtotyössä. Pumppujen ja puhaltimien kiinteä nopeus pitää siirtotehon tarpeettoman korkeana osakuormalla. Kun nopeus ohjataan paine-, virtaus- tai ΔT -perusteisesti (tai rakennusautomaatiassa ns. “eniten auki olevan venttiilin” logiikalla), siirtolaitteiden teho laskee epälineaaraisesti nopeuden mukana. Tämä nostaa järjestelmä-COP/EER-arvoa riippumatta siitä, kuinka tehokas kompressori sinänsä on, koska apulaitteiden osuus kokonaiskulutuksesta voi muutoin kasvaa merkittäväksi. (Elo 2023, 22–23.)

Jotta edellä mainitut hyödyt realisoituvat, anturoinnin ja syöttösäädön on toimittava oikein. Ylikuumentaman ja alijäähtyksen vakaus varmistaa lämmönsiirron ja kompressorin suojan. Väärä anturipaikka tai kalibroimaton anturi johtaa systemaattiseen säätövirheeseen, joka näkyy suoraan energiankulutuksessa (Kuusisto 2021, 14–16). Ilmalähteisissä ratkaisuissa sulatuksen ohjauksella on lisäksi oma, selvä

kulutusvaikutuksensa. Ajastettu sulatus käynnistyy silloinkin, kun jäätä ei ole, ja katkaisee lämmön- tuoton 5–15 minuutiksi, mikä heikentää hetkellistä COP:ia ja kumuloituu kausitasolla. Tarveperusteinen sulatus (paine-/lämpötilaerot tai jääanturi) vähentää näitä turhia jaksoja ja näkyy SCOP-parannuk- sena (Kontio 2020, 15–16).

Käytännön johtopäätös on, että säädöllä vaikutetaan sekä kompressorin työhön että siirtotyöhön. Dynaamiset setpointit ja lauhdituksen kellutus pienentävät puristussuhdetta. Invertterit poistavat jakso- tusta ja pitävät prosessin lähellä tavoitetta. Taajuusohjattu siirtotyö sekä tarveperusteinen sulatus leik- kaavat ”turhaa” kulutusta. Kun nämä toimenpiteet otetaan käyttöön ja niiden vaikutus todennetaan trendeistä (1–5 min näytteenotto seurattavat KPI:t: COP/EER, SCOP/SEER, käynnistyskerrat ja -tun- nit, sulatusten määrä/kesto, pumppujen/puhaltimien keskimääräinen taajuus), energiansäästö ei jää ker- taluonteiseksi, vaan toteutuu arjessa ilman käyttövarmuuden heikkenemistä. (Elo 2023, 22–23; Kuu- sisto 2021, 17–18.)

4.4 Käytön aikainen seuranta ja energiahallinta

Monissa kohteissa syntyy samanaikaisesti sekä jäähdytys- että lämmitystarpeita (toimisto- ja liikera- kennukset, uimahallit, ruokakaupat, prosessit). Tällöin kompressorin lauhdelämpö voidaan ottaa tal- teen ja käyttää hyödyksi esimerkiksi käyttöveden tai lämmitysverkon esilämmityksessä. Peruseriaate on, että sama kompressorityö tuottaa sekä ”kylmää” että ”lämpöä”. Näin järjestelmän kokonaisyöty- suhde nousee, kun sähköä kohdistuu kahteen hyötyvirtaan samanaikaisesti. (Jokinen 2024, 22–24; Elo 2023, 21–23.)

Lämmön talteenotto voidaan toteuttaa usealla tavalla. Yksinkertaisin on lauhdutuslämmön osittainen talteenotto lauhduttimen rinnalle sijoitetulla kuuman kaasun lämmönsiirtimellä, jolloin käyttöveden esilämmitys ei nosta lauhdituksen asetustasoa. Laajempi ratkaisu on lämpöpumppuchilleri, jossa ko- neikon ohjaus jakaa tuoton dynaamisesti kylmävesi- ja lämmitysverkkoon hyötylämpöä priorisoiden. Ohjauksessa keskeistä on, ettei lämmön talteenoton takia koroteta lauhdituksen lämpötilaa enempää kuin on käyttötarpeen kannalta välttämätöntä. Muuten kompressorin ottoteho kasvaa ja kokonaisyöty- suhde heikkenee. Tämän vuoksi käytetään kaskadoituja asetusarvoja ja prioriteettilogiikkaa: esim. 1) käyttövesi/esilämmitys, 2) lämmitysverkko, 3) ylimäärän purku ulos ja lauhdituksen taso kelluu aina alimpaan käyttökelpoiseen arvoon. (Jokinen 2024, 22–24; Elo 2023, 21–23.)

Käyttövedessä tarvittava lämpötilataso (55–60 °C) edellyttää usein erillistä varaajaa ja kerrostettua lautausta, jotta esilämmitetty vesi voidaan nostaa pastörintijaksoin vaadittuun tasoon. Ratkaisuna on tyyppillisesti kaksivaiheinen kuorma. Esilämmitys lauhdelämmöllä ja huipun nosto sähkö- tai erillisellä korkean lämpötilan lämpöpumpulla. Luonnollisia kylmäaineita käyttävät järjestelmät soveltuvat hyvin korkeamman lämpötilan lämmön talteenottoon. CO₂-järjestelmissä transkriittinen käyttö ja kaasunjäähdyttimen paineoptimointi mahdollistavat korkean poistuvan veden lämpötilan, kun ohjaus asettaa paineen ulko-olosuhteiden mukaan. (Morsari 2025, 30–35.)

Jäähdytys- ja lämmityspiirien hydraulikka vaikuttaa ratkaisevasti hyötyyn. Varmennettu virtaamataspaino, riittävä ΔT molemmissa verkoissa ja hydraulinen erotus estävät ristiin virtausta ja varmistavat, että talteenoton lämpö siirtyy todelliseen kuormaan, ei takaisin koneikon ohitukseen. BMS-tasolla ohjaus koordinoi kolmitieventtiilit, pumppujen taajuuden ja set Point resetin niin, että sekä kylmä- että lämpöpuolen asetusarvot ovat aina tarpeeseen nähden pienimmät. Näin puristussuhde pysyy matalana myös heat recovery tilassa. (Elo 2023, 21–23.)

Käytännön mitoituksessa tavoitteena ei ole maksimoida talteenoton määrää hinnalla millä hyvänsä, vaan löytää optimaalinen lauhdutustaso, jolla hyödynnetty lämpö on todelliseen tarpeeseen eikä aiheuta kohtuutonta sähkötehon lisäystä. Siksi lämmön talteenotto kytketään tiiviisti kohteen kuorma-profiiliin. Jos käyttöveden tai lämmitysverkon tarve on ajoittaista, varaaja (lämpöakku) tasaa eriaikaisuutta ja estää lauhdutuksen tarpeettoman nousun hetkellisten piikkien takia. Ohjauksen prioriteettimatriisi ja rajat (minimi lauhdutuksen lämpötila, maksimi kaasunjäähdyttimen paine CO₂-järjestelmissä, minimi pumppunopeudet) dokumentoidaan ja todennetaan trendeistä (1–5 min), jotta laskennallinen hyöty realisoituu käytössä. (Jokinen 2024, 22–24; Elo 2023, 21–23.)

Kertauksena lämmön talteenotto parantaa järjestelmän kokonaishyötysuhdetta, kun ohjaus priorisoi järkevästi ja lauhdutuksen taso pidetään niin alhaalla kuin käyttötarkoitus sallii. Parhaat tulokset saavutetaan, kun talteenotto on integroitu osaksi dynaamista set Point-strategiaa, hydraulikka on tasapainossa, ja CO₂- tai ammoniakkiratkaisuissa hyödynnetään korkean lämpötilan toimintakenttää hallitulla paineoptimoinnilla. (Rautiainen 2023.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Työn tavoitteena oli muodostaa kirjallisuuteen nojaava, käytännönläheinen kokonaiskuva siitä, miten lämpöpumppuja ja kylmäkoneikkoja kannattaa ohjata niin, että energiatehokkuus paranee ilman käyttövarmuuden heikkenemistä. Narratiivinen katsaus osoitti varsin johdonmukaisesti, että suorituskykyä ei ratkaise yksittäinen laiteratkaisu vaan tapa, jolla järjestelmää ajetaan vaihtelevissa olosuhteissa.

Siksi keskeinen johtopäätös on, että energiatehokkuus on ennen kaikkea ohjaus- ja seurantakysymys. Kirjallisuuden perusteella vaikuttavin yhdistelmä muodostuu neljästä periaatteesta. Ensinnäkin lauhdutus- tason kellutus leudoissa oloissa ja höyrystystason nosto sallituissa rajoissa pienentävät puristus- suhdetta ja siten kompressorin tarvitsemaa sähkötehoa. Toiseksi kompressorin, pumppujen ja puhalti- mien invertterisäätö mahdollistaa kuorman portaattoman sovittamisen ilman jaksotusta. Tämä näkyy erityisesti osakuormakaudella, joka muodostaa suurimman osan käyttöajasta. Kolmanneksi ilmalähtei- sissä ratkaisuissa tarveperusteinen sulatus, joka käynnistyy ja päättyy mitatun tilan mukaan, vähentää turhia 5–15 minuutin lämmityskatkoksia ja parantaa kausihyötysuhdetta. Neljänneksi ratkaisuksi osoit- tautuivat dynaamiset set Point käyrät menovedelle, kylmävedelle ja lauhdutukselle. Ne sitovat proses- sin olosuhteisiin ja käyttötilanteeseen sen sijaan, että järjestelmää ohjattaisiin kiinteillä arvoilla. Kun nämä periaatteet otetaan yhtä aikaa käyttöön, sekä hetkellinen hyötysuhde (COP/EER) että kausitaso (SCOP/SEER) paranevat ilman, että järjestelmän suojaus- ja turvallisuusreunaehdot vaarantuvat.

Käyttöänoton kannalta määräävä tekijä on näkyvyys prosessiin. Ilman luotettavaa anturointia (lämpöti- lat, paineet, virtaamat, sähköteho) ja riittävää trendinäytteenottoa (1–5 min) ohjausta on pakko pitää varovaisena, koska muutosten vaikutuksia ei voida todentaa. Tämän työn perusteella järkevä etenemis- malli on vaiheittainen. Ensinnäkin mittaukset ja suoja-arvot kuntoon sekä pisteiden selkeä nimeäminen ja sen jälkeen varovainen asetusarvojen resetointi ja lauhdutus- tason kellutus konservatiivisilla minimeillä. Seuraavaksi inverttereiden viritys kantamaan peruskuormaa ja lopuksi tarveperusteisen sulatuksen kri- teerien käyttöönotto. Jokaisesta vaiheesta tehdään ennen–jälkeen-vertailu selkeillä avainmittareilla (esim. kompressorin käynnistyskerrat ja -tunnit, sulatusten määrä ja kesto, pumppujen ja puhaltimien keskinopeudet, arvioitu SCOP/SEER). Tällainen “pienin askelin” lähestyminen minimoi riskit ja si- touttaa ylläpidon pysyvään seurantaan.

Lämmön talteenoton osalta keskeinen havainto on priorisoinnin tarve. Kun samaa kompressorityötä hyödynnetään sekä jäähdytykseen että lämpöön, ohjauksen on varmistettava, ettei lauhdutus- tason taso

koroteta talteenoton vuoksi enempää kuin on välttämätöntä. Käytännössä tämä tarkoittaa prioriteettilogiikkaa, jossa lauhdutuksen asetusarvoa nostetaan vain todetun lämmöntarpeen mukaan ja lasketaan viiveettä takaisin, kun tarve poistuu. Näin talteenotosta tulee aidosti “sivutuote”, ei energiatehokkuutta huonontava tavoite.

Työn luotettavuuden arvioinnissa on huomioitava aineiston luonne. Koska kyse on kirjallisuuskatsauksesta, johtopäätökset ovat periaatteita ja mekanismeja, eivät kohdekohtaisia säästölukuja. Osa lähteistä on valmistajamateriaalia tai opinnäytteitä, mikä voi tuoda valikoitumis- tai raportointivinoumaa. Lisäksi kylmäaineiden ominaisuudet ja turvallisuusluokat (esim. A2L, A3, CO₂) sekä eri järjestelmäarkkitehtuurit asettavat erilaisia rajoja minimi-ilmavirroille, kierrosluvuille ja lämpötiloille. Nämä tekijät rajaavat yleistettävyyttä, ja siksi esitetyt toimet on aina todennettava kohdekohtaisesti käyttöönottoaiheen trendeissä.

Jatkokehittämisen kannalta tarkoituksenmukaisin askel on rajattu pilotti todellisessa kohteessa. Pilotti määrittelee etukäteen muutettavat raja-arvot, mittarit ja seurantajakson. Muutos tehdään vaiheittain ja vaikutus arvioidaan samojen säiden ja kuormien puitteissa niin pitkälle kuin mahdollista. Seuraava kehityspolku liittyy ennakoivaan ohjaukseen (säännusteisiin perustuvat setpointit) ja automaattiseen vika- ja suorituskykyanalytiikkaan, joiden avulla ohjaus pystyy reagoimaan poikkeamiin ilman manuaalista tulkintaa. Lisäksi kysyntäjousto ja sähkön hinnan huomioiva ajotapa voivat jatkossa tuottaa lisäsähyötä, kunhan perusohjaus ja mittaus ovat kunnossa.

Tekijän näkökulmasta työn merkittävin oppi on, että “hyvä laite” ei yksin riitä. Sama järjestelmä voi toimia erinomaisesti tai keskinkertaisesti riippuen siitä, miten setpointit, suojat ja mittaukset on viritetty ja miten muutoksia seurataan. Tämä tekee ohjauksesta paitsi teknisen myös organisatorisen kysymyksen. Kun mittaaminen, dokumentointi ja kuukausittainen katselmus vakiinnutetaan osaksi ylläpitoa, energiatehokkuus ei jää kertaluonteiseksi projektiksi vaan muuttuu toimintatavaksi.

LÄHTEET

- Elo, R. 2023. *Jäähdytys- ja kylmälaitteiden elinkaari*. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023121537522>. Viitattu 1.11.2025
- Hakala, P. & Kaappola, E. 2013. *Kylmälaitoksen suunnittelu*. Tampere: Opetushallitus.
- Hänninen, H., Karppinen, M., Leskelä, M. & Pohjakallio, M. 2019. *Tekniikan kemia*. Helsinki: Otavan Kirjapaino Oy.
- ISO 817. *Refrigerants — Designation and safety classification*. Geneva: International Organization for Standardization. 2024. Saatavissa: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:817:ed-4:v1:en> Viitattu 27.10.2025
- Jokinen, H. 2024. *Tulevaisuuden kylmäaineet talotekniikan sovellutuksissa*. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2024112630148> Viitattu 12.11.2025
- Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J. 2014. *Kylmätekniiikan perusteet*. Juvenus Print - Suomen Yliopistopaino Oy.
- Kontio, J. 2020. *Ilmalämpöpumpun lämpökerrointutkimus*. Centria-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202002212644>. Viitattu 1.11.2025
- Kraft, R. 2024. *Lämpöpumpun valintaopas pientaloon*. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202402153029>. Viitattu 8.11.2025
- Kuusisto, N. 2021. *Kylmälaitoksen kunnossapito*. Oulun ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202105057049>. Viitattu 4.11.2025
- Morsari, M. 2025. *Teollisuuslämpöpumput ja luonnolliset kylmäaineet*. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2025060219059>. Viitattu 4.11.2025
- Ozone 2018. *Selecting the right refrigerant for commercial refrigeration*. 1-20. Saatavissa <https://ozone.unep.org/system/files/documents/GlobalFACT-whitepaper-%20FINAL.pdf> Viitattu 3.2.2026
- Perälä, R. 2009. *Lämpöpumput*. Helsinki: Alfamer.
- Rautiainen, T. 2023. *Sähköistämällä energiatehokkuutta teollisuudessa*. Kirjallisuusselvitys. Helsinki. Saatavissa: https://www.motiva.fi/wp-content/uploads/sites/2/2026/02/Sahkoistamalla_energiatehokkuutta_teollisuudessa_kirjallisuusselvitys_2024.pdf Viitattu 3.2.2026
- Räisä, J. 2013. *Maalämpöpumppulaboratorion kehittäminen*. Opinnäytetyö. Theseus. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305168974>. Viitattu 8.11.2025
- SFS-EN 14511-1:2022. *Tilojen lämmitykseen ja jäähdytykseen tarkoitetut huoneilmastointikoneet, nestejäähdyttimet ja lämpöpumput sekä prosessijäähdytyslaitteet, joissa on sähkökäyttöinen kompressori. Osa 1: Termit ja määritelmät*. 2022. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1156592.html.stx> Viitattu 26.10.2025

Jian Sun, Yanfei Li, Nawaz Kashif, Xiaobing Liu, Jamie Lian, Anthony Pagnotti, Emily Neill, Peter Donald. 2025. Comparative performance assessment of air-source and ground-source heat pumps using CO₂ and R-410A with water well integration: A simulation study. 114. Saatavissa: [Comparative performance assessment of air-source and ground-source heat pumps using CO₂ and R-410A with water well integration: A simulation study - ScienceDirect](#) Viitattu 3.2.2026

SFS-EN 14825. *Ilmastointilaitteet ja lämpöpumput — kausittainen energiatehokkuus (SCOP/SEER)*. 2022. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/1134896.html.stx> Viitattu 26.10.2025

SFS-EN 378. *Kylmälaitokset ja lämpöpumput — turvallisuus- ja ympäristövaatimukset*. 2020. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/3/1151486.html.stx> Viitattu 26.10.2025

Vaillant. (2022). Mikä on kylmäaine?. Saatavissa: <https://www.vaillant.fi/asiakkaat/neuvoja-ja-tieto/lammitysanasto/refrigerant-1925130.html> Viitattu 2.2.2026