



Jarmo Mäenpää

Tutkimus kylmäjärjestelmän energi- antehokkuuden tehostamisesta asennuksen, kunnossapidon ja huollon osalta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

29.03.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Jarmo Mäenpää
Otsikko:	Tutkimus kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden tehostamisesta asennuksen, kunnossapidon ja huollon osalta
Sivumäärä:	44 sivua + 4 liitettä
Aika:	29.3.2025
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	DI Harri Fränti, Kouluttaja yliopettaja Rauno Holopainen

Kylmätekniikan ala, joka sisältää jäähdytyksen ja ilmastoinnin, kasvaa ja muuttuu nopeasti sekä Suomessa että kansainvälisesti. Alalla on tapahtunut merkittäviä muutoksia erityisesti lainsäädännön ja teknologian osalta. Uuden EU-asetuksen 2024/573 mukaisesti on vähennettävä F-kaasujen käyttöä ja siirryttävä luonnollisiin kylmäaineisiin siirtymäajan puitteissa. Lainsäädäntö edellyttää tiukentamaan F-kaasujen käsittelyä, vähentämään niiden määrää markkinoilla, tehostamaan olemassa olevien kylmäjärjestelmien energiatehokkuutta sekä korvaamaan F-kaasut luonnollisilla vaihtoehdoilla.

Tässä opinnäytetyössä koottiin yhteen kylmäjärjestelmien energiatehokkuutta käsittelevä materiaali erityisesti asentamisen ja huollon näkökulmasta. Opinnäytetyössä arvioitiin kylmäaineen vaihdon vaikutusta kylmäjärjestelmien energiatehokkuuteen. Opinnäytetyössä toteutettiin mittauksia, joissa arvioitiin kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden muuttumista kylmäaineen vaihdon myötä, erityisesti kompressorin, höyrystimen ja lauhduttimen osalta. Lisäksi tutkittiin järjestelmän komponenttien kunnon ja säätöjen vaikutusta kokonaisenergiatehokkuuteen.

Tulokset osoittivat, että kylmäaineen vaihdolla on selvä vaikutus eri komponenttien energiatehokkuuteen johtuen kylmäaineiden erilaisista termodynaamisista ominaisuuksista. Järjestelmän uudelleen säätäminen ja mitoituksen tarkistaminen kylmäainevaihdon yhteydessä on olennaista energiatehokkuuden optimoimiseksi.

Yleisesti käytössä olevat suunnittelutyökalut tuottavat luotettavia tuloksia vain, jos niiden laskennalliset parametrit vastaavat riittävästi käytännön olosuhteita. Suunniteltaessa uutta kylmäjärjestelmää suositellaan aina toteuttamaan mittauksia ja vertaamaan tuloksia suunnitteluvaiheessa laskettuihin arvoihin.

Avainsanat: Kylmäjärjestelmä energiatehokkuus, kylmäaineen vaihto

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Jarmo Mäenpää
Title: Improving Energy Efficiency of Refrigeration System during Installation, Maintenance and Repair
Pages: 44 pages + 4 appendices
Date: 29 of March 2025
Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Supervisors: Harri Fränti, M. SC., Lecturer
Rauno Holopainen, Principal Lecturer

The objective of the thesis was to compile information about the energy efficiency of refrigeration systems from a field operation's perspective as a response to the EU Directive 2024/573, which mandates a reduction in F-gases and encourages the use of natural refrigerants, thus requiring a more stringent management of F-gases, improved system efficiency, and a greater adoption of eco-friendly alternatives.

Research on refrigeration system energy efficiency, particularly from maintenance and operational perspectives, was studied. Furthermore, a practical study to measure the impact of refrigerant replacement on energy efficiency and system components was conducted.

The results of the final year project indicated that the change of refrigerant has an impact on component efficiency due to variations in evaporation and condensation temperatures and pressures. Therefore, it seemed that system recalibration is necessary when switching refrigerants to optimize efficiency. Furthermore, proper maintenance, refrigerant flow adjustments, and precise charge levels were seen to be essential for achieving optimal energy efficiency performance. Additionally, while design tools can predict energy efficiency, real-world measurements often differ, highlighting the importance of validation.

The study concluded that replacing F-gases is essential for global climate protection. Regularly measuring and adjusting the energy efficiency of refrigeration systems is also important.

Keywords: refrigeration system, energy efficiency, refrigerant replacement

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Kirjallisuustutkimus	2
1.2	Tapaustutkimus	2
2	Kylmäjärjestelmien rakenne	2
3	Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden laskentamalli	4
4	Kylmäjärjestelmän sähkönkulutus	7
4.1	Kotitaloudet	8
4.2	Päivittäistavarakauppa	10
4.3	Teollisuus	13
4.4	Logistiikan kylmäketju	14
4.5	Muut kohteet	14
5	Mittausjärjestelmä ja testipenkki	15
5.1	Testipenkki	15
5.2	Mittausjärjestelmä	16
6	Mittaukset ja analyysi	19
6.1	Määritetyt testisarjat	19
6.2	Vaihdettiin kylmäaine	20
6.3	Järjestelmän käyntiolosuhtemuutoksen vaikutus energiatehokkuuteen	24
6.3.1	Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta säädettiin minimiin	25
6.3.2	Imuvirtauksen pienentäminen	27
6.3.3	Lisälämmönsiirtimen käytön vaikutus	30
6.3.4	Saatujen mittaustulosten erojen arviointi	32
6.4	Suunnittelutyökalun ja energiatehokkuusmittausten välinen ero	36
6.5	Työkalujen energiatehokkuustulosten vertailu	38
7	Yhteenveto	38
	Lähteet	41

Liite 1: Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden kirjallisuuskooste

Liite 2: Kylmäjärjestelmän hyödyntäminen kiinteistön energiantuotannossa

Liite 3: Kylmäaineiden ilmastovaikutus ja energiatehokkuuden laskenta

Liite 4: Climacheck lite-mittausjärjestelmän energiatehokkuuden laskentamalli

Lyhenteet

EER: Energy Efficiency Ratio. Energiatehokkuuskerroin on erityisesti ilmastointilaitteiden ja lämpöpumppujen yhteydessä käytetty mittari, joka kuvaa laitteen tuottaman jäähdytys- tai lämmitystehon suhdetta sen kuluttamaan sähkötehoon.

ESEER: European Seasonal Energy Efficiency Ratio. Täyden ja osakuorman yhdistetty energiatehokkuuskerroin on erityisesti jäähdytyslaitteiden energiatehokkuuden mittaamiseen eurooppalaisissa olosuhteissa käytettävä indikaattori. Arvo kuvaa laitteen suorituskykyä osakuormitustilanteissa, jotka perustuvat käyttöön ja ilmasto-olosuhteisiin kauden aikana

Kylmäjärjestelmä: Viittaa laitteistoon tai järjestelmään, joka tuottaa ja ylläpitää kylmää lämpötilaa. Kylmäjärjestelmät ovat olennainen osa monia teollisuudenaloja, kuten elintarviketeollisuutta, lääketieteellisuutta ja päivittäistavarakauppaa.

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuus: Tarkoittaa sitä, kuinka hyvin kylmälaite, kuten jääkaappi, pakastin tai ilmastointilaitte, hyödyntää käyttämänsä energiaa tuottaakseen tarvittavan jäähdytys- tai lämpöpumppauskapasiteetin. Energiatehokkuutta mitataan usein hyötysuhteen kautta, ja se vaihtelee laitteiston teknologian, käyttöolosuhteiden ja huoltotason mukaan.

SEER: Seasonal energy efficiency ratio. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin.

SEI: System Efficiency index. Järjestelmän kokonaistehokkuus indeksi arvioi järjestelmän suorituskykyä verrattuna teoreettiseen maksimiin mitatuissa olosuhteissa. Arvoa käytetään vertaamaan eri koneita tai järjestelmiä keskenään ja arvioimaan, onko suorituskyky heikompi

kuin suunniteltu. SEI auttaa tunnistamaan tehostamistarpeet, kuten säätöjen tai huollon osalta. Teoreettinen maksimiarvo perustuu Carnot menetelmän tehokkuuteen.

TEWI: Total Equivalent Warming Impact. Kokonaislämpenemisvaikutus kuvaa kylmä-, ilmastointi- ja lämpöpumppujärjestelmien kokonaiskasvihuonevaikutusta niiden elinkaaren aikana. TEWI-arvo sisältää laitteen käyttämän kylmäaineen aiheuttamat mahdolliset päästöt (suora vaikutus) sekä laitteen toiminnasta johtuvan energiankulutuksen ja siihen liittyvät hiilidioksidipäästöt (epäsuora vaikutus).

1 Johdanto

Kylmätekniikka-ala, joka kattaa jäähdytyksen ja ilmastoninnin, kasvaa nopeasti. Lainsäädäntö ja teknologia ovat muuttuneet, ja kylmäjärjestelmissä käytetään monia erilaisia kylmäaineita ja teknisiä ratkaisuita. Kylmätekniikka kuluttaa merkittävästi sähköä ja aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä. F-kaasujen osuus ilmakehän CO₂-päästöistä on noin 2 %, ja niiden käytön lisääntyminen kasvattaa päästöjä ilman uutta lainsäädäntöä. EU asetus 2024/573 vaatii vähentämään HFC- ja HFO-kylmäaineiden käyttöä ja siirtymään luonnollisiin kylmäaineisiin.

Suomessa lämmöntuotannon päästöjen vähentäminen vaatii osittaista sähköistämistä, johon käytetään suuria lämpöpumppuja. EU:ssa tiedostetaan lämpöpumppujen merkitys tässä muutoksessa ja uutta asetusta perustellaan huolella HFC- ja HFO-aineiden käytön lisääntymisestä. Lainsäädäntö edellyttää tiukentamaan F-kaasujen käsittelyä, vähentämään markkinoilla olevien F-kaasujen määrää, tehostamaan olemassa olevien F-kaasujen käyttöä, parantamaan olemassa olevien kylmäjärjestelmien energiatehokkuutta ja korvaamaan F-kaasuja luonnollisilla kylmäaineilla kylmäjärjestelmissä [1].

Uusi asetus laajentaa kylmäalalla toimijoiden osaamisalueita ja korostaa energiatehokkuutta osana kylmäpätevyyttä [1]. F-kaasusetus tuli voimaan Suomessa 1.1.2025 osana päivitettyä ympäristölakia [2]. Kylmäjärjestelmät ovat yksilöllisiä. Niiden suunnittelu ja toteutus vaikuttaa toteutuneeseen energiatehokkuuteen. Tätä asiaa käsitellään kirjallisuustutkimuksessa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia kirjallisuustutkimuksessa järjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavia teknisiä riippuvuuksia sekä luonnollisten kylmäaineiden eroa F-kaasuihin energiatehokkuuden osalta. Tutkimuksessa tehdään myös järjestelmämittauksia ja -analyyssejä, jotka koskevat kylmäaineen vaihdon ja järjestelmän käyntiolosuhteiden vaikutusta kylmäjärjestelmän energiatehokkuuteen. Opinnäytetyö toimii pohjatietona kylmälupakoulutuksen

energiatehokkuuden koulutukselle ja taustatietojen varmentamiselle. Suomessa ei ole vielä julkaistu vastaavaa yhtenäistä opasta tai koulutus kirjallisuutta kylmäjärjestelmän energiatehokkuudesta.

1.1 Kirjallisuustutkimus

Kirjallisuustutkimus perustuu suomalaisiin ja kansainvälisiin tutkimuksiin sekä koulutusmateriaaliin koskien kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta. Tutkimuksessa käytetään kvalitatiivisia menetelmiä. Suuri osa tutkimustuloksesta on sijoitettu liiteosioon. Pääasialliset tietolähteet ovat julkaisut, oppikirjat ja asiantuntijoiden kommentit.

1.2 Tapaustutkimus

Kylmähuoneen kylmäjärjestelmän kvalitatiivinen tutkimus mittaa energiatehokkuutta pääkomponenttien ja kokonaisuuden tasolla kaupallisen työkalun Climacheck lite-mittausjärjestelmän [3] avulla. Tapaustutkimus vertailee myös suunnittelutyökalun ja energiatehokkuusmittausjärjestelmän tuloksia selvittääkseen järjestelmän tilan vaikutuksen energiatehokkuuteen.

2 Kylmäjärjestelmien rakenne

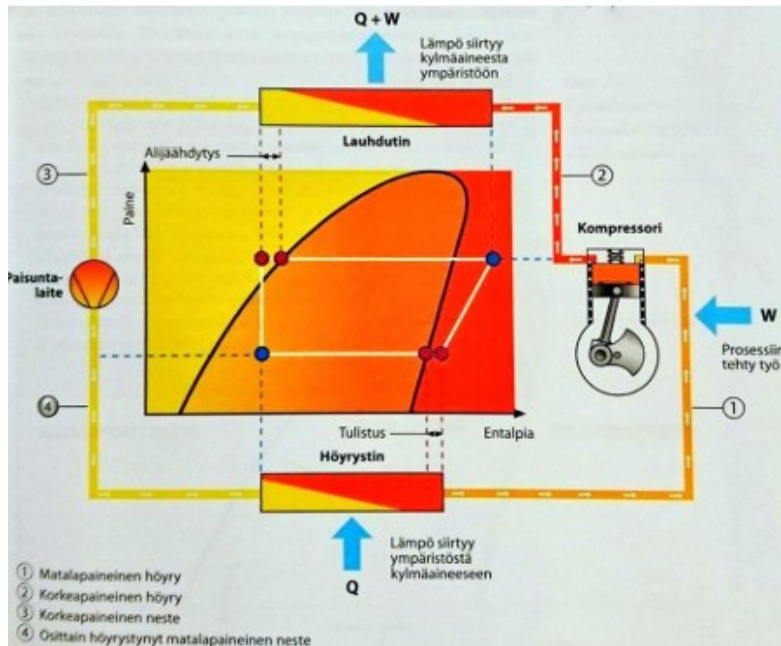
Kylmäjärjestelmä on tekninen järjestelmä, joka on suunniteltu tuottamaan kylmää lämpötilaa tai siirtämään lämpöä pois tietyltä alueelta tai kohteesta. Näitä järjestelmiä käytetään laajasti monilla eri aloilla ja sovelluksissa, ja ne voivat olla hyvin erilaisia riippuen käyttötarkoituksesta.

Tässä on muutamia yleisiä esimerkkejä olemassa olevista kylmäjärjestelmistä [4; 5; 6].

- Ilmastointilaitteita käytetään sisätilojen jäähdyttämiseen ja ilmastointiin. Ne poistavat lämpöä rakennusten sisältä ja siirtävät sen ulos, mikä parantaa sisäilman viihtyisyyttä ja tekee kuumista ilmastoista siedettävämpiä.

- Jääkaappeja ja pakastimia käytetään ruoan ja muiden tuotteiden säilyttämiseen alhaisessa lämpötilassa, jotta ne eivät pilaantuisi. Kotitalouksissa, kaupoissa ja teollisuudessa käytetään erilaisia jääkaappeja ja pakastimia.
- Teollisia jäähdytysjärjestelmiä käytetään monilla teollisuudenaloilla, kuten elintarviketeollisuudessa, kemianteollisuudessa ja lääkealalla, lämpötilan säätelyyn ja tuotteiden säilytykseen. Esimerkiksi suurissa kylmävarastoissa säilytetään helposti pilaantuvia elintarvikkeita.
- Kylmäketjun logistiikkajärjestelmä kattaa koko prosessin tuotteen valmistuksesta kuluttajalle. Se sisältää tuotteiden jäähdyttämisen ja pakastamisen tuotannon, varastoinnin, kuljetuksen ja jakelun aikana.
- Datakeskukset, joissa säilytetään suuria määriä tietoa ja jotka käyttävät paljon sähköä, tarvitsevat tehokkaita jäähdytysjärjestelmiä estääkseen ylikuumentumisen ja varmistaakseen laitteiden toimivuuden.

Kylmäjärjestelmät toimivat lämpöpumpun periaatteella, jossa kylmäaine kiertää suljetussa järjestelmässä ja siirtää lämpöä paikasta toiseen muuttamalla olo-
muotoaan nesteestä kaasuksi ja takaisin kaasusta nesteeksi. Tämä kiertopro-
sessi mahdollistaa tehokkaan lämmönsiirron ja alhaisten lämpötilojen ylläpitämi-
sen. Kuvassa 1 on esitetty kylmäjärjestelmän kiertoprosessi [7]. Kuvassa on
esitetty myös pääkomponenttien sijainnit kiertoprosessissa.



Kuva 1. Kylmätekniinen kiertoprosessi [7].

3 Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden laskentamalli

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuus tarkoittaa sitä, kuinka hyvin kylmälaite hyödyntää käyttämänsä energiaa tuottaakseen tarvittavan jäähdytys- tai lämpökapasiteetin. Kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta mitataan usein kylmäkerroimen avulla. Kylmäkerroin vaihtelee laitteiston teknologian, käyttöolosuhteiden ja huoltotason mukaan.

Energiatehokkuutta parantamalla saavutetaan seuraavat edut [8]:

- Korkea energiatehokkuus kuluttaa vähemmän energiaa saman jäähdytys- tai lämmitystehon tuottamiseksi. Tämä pienentää sähkölaskua.
- Positiiviset ympäristövaikutukset vähenevinä ilmastopäästöinä.
- Parempi energiatehokkuus vähentää energiantuotannosta syntyviä hiilidioksidipäästöjä, mikä auttaa hillitsemään ilmastomuutosta.
- Energiatehokas järjestelmä toimii vähemmän rasittuneena ja voi näin ollen pidentää kylmäjärjestelmän käyttöikää ja vähentää huoltotarpeita.

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden laskennallisia standardoituja mittareita ovat seuraavat:

- EER (Energy Efficiency Ratio) [9]
- ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) [10]
- TEWI (Total Equivalent Warming Impact) [9].

EER kylmäkerroin mittaa laitteen jäähdytystehon ja kulutetun sähkön suhdetta vakiintuneessa olosuhteessa [9]. Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden laske-
miseksi käytetään kylmäkerrointa, joka kuvaa kuinka tehokkaasti järjestelmä
muuntaa käytetyn energian hyödylliseksi jäähdytystehoksi. Tämä hyötysuhde
tunnetaan yleensä nimellä EER (Energy Efficiency Ratio) [9] EER lasketaan
seuraavasti:

$$EER = \frac{\text{Jäähdytysteho } P_h [kW]}{\text{Sähköteho } W [kW]} \quad (1)$$

Kaavassa 1 parametrit on kuvattu seuraavasti:

- P_h on höyrystymiseen siirtymä lämpöteho jäähdytettävästä tilasta (kW).
- W on kompressorin ja muiden komponenttien kuluttama sähköteho (kW).

Höyrystimen teho P_h saadaan valmistajan teknisistä tiedoista tai mittauksilla. Sähköteho W mitataan tai selvitetään kompressorien kulutuksesta sähköteho-
mittareilla tai laitteen teknisistä tiedoista.

ESEER [10] on EER:n kausivaihtoehto, joka ottaa huomioon laitteen energiate-
hokkuuden koko vuoden aikana vaihtelevissa käyttöolosuhteissa. ESEER:n
avulla voidaan arvioida, kuinka hyvin kylmäjärjestelmä toimii eri lämpötiloissa ja
vaihtelevilla kuormilla. Tämä mittari on hyödyllinen erityisesti kylmälaitteistoille,
joiden höyrystin tai lauhdutin altistuvat ilmaston vaihteluille eri vuoden aikoina.
ESEER lasketaan seuraavalla painotetulla keskiarvokaavalla:

$$ESEER = EER_{10\%} \cdot 0,03 + EER_{75\%} \cdot 0,33 + EER_{50\%} \cdot 0,41 + EER_{25\%} \cdot 0,23 \quad (2)$$

Kaavassa 2 parametrit on kuvattu seuraavasti:

- EER100% on laitteen energiatehokkuus täydessä kuormituksessa.
- EER75% on laitteen energiatehokkuus 75 % kuormituksessa.
- EER50% on laitteen energiatehokkuus 50 % kuormituksessa.
- EER25% on laitteen energiatehokkuus 25 % kuormituksessa.
- Painotukset (0,03, 0,33, 0,41 ja 0,23) perustuvat tyyppillisiin käyttöolosuhteisiin Euroopassa.

TEWI (Total Equivalent Warming Impact) on mittari, joka arvioi kylmäjärjestelmän ilmastovaikutuksia ottaen huomioon sekä suorat että epäsuorat kasvihuonekaasupäästöt koko laitteen elinkaaren aikana. TEWI on tärkeä mittari arvioitaessa kylmäjärjestelmien ympäristövaikutuksia, sillä se yhdistää energiankulutuksen (epäsuorat päästöt) ja kylmäaineiden vuotamisen (suorat päästöt) [9].

TEWI:n laskentakaava on seuraava:

$$TEWI = (GWP \cdot m \cdot L \cdot n) + (GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha)) + (E \cdot \beta \cdot n) \quad (3)$$

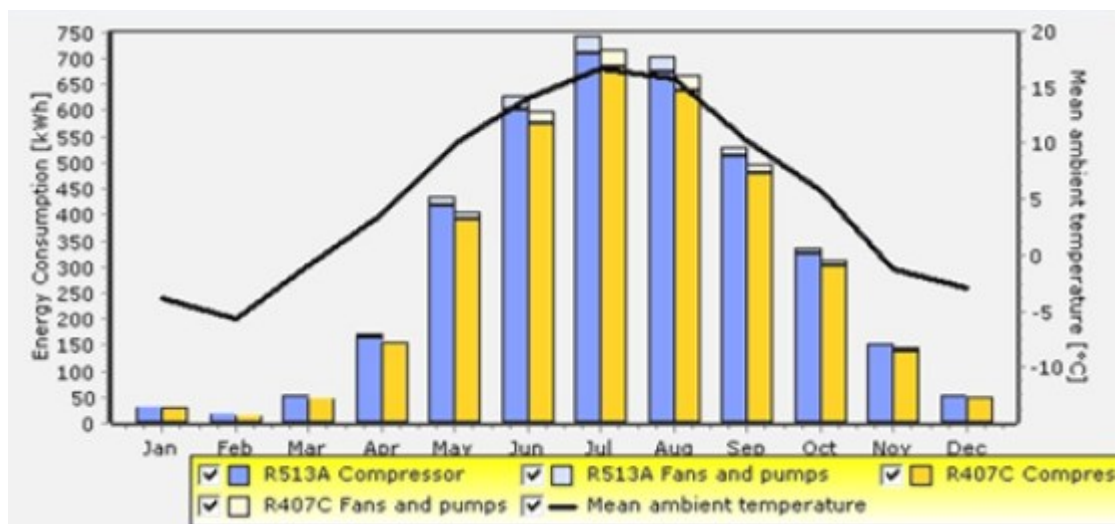
Kaavassa 3 parametrit on kuvattu seuraavasti:

- GWP on kylmäaineen globaali lämpenemispotentiaali.
- m on kylmäaineen kokonaismäärä järjestelmässä (kg).
- L on arvioitu vuotojen määrä kg/vuosi.
- n on järjestelmän käyttöikä (vuosia).
- α on kylmäaineen talteenottoaste elinkaaren lopussa (%/100).
- E on järjestelmän energiankulutus (kWh/vuosi).
- β on hiilidioksidin päästökerroin sähköntuotannolle (kg CO₂/kWh).

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta laskettaessa käytetään yleensä markkinoilla olevia työkaluja, joiden avulla voidaan laskea tulos matemaattisesti. Tyyppillisiä työkaluja ovat valmistajien työkalut: Suomessa tunnettuja ovat esimerkiksi Danfoss Coolselector2, Bitzer SW, Solkane, Pack Calculation pro. Tällaisilla työkaluilla voidaan mitoittaa putkisto- ja komponenttikoot.

Pack Calculation pro-simulointiohjelmaa voidaan käyttää myös ilmastovaikutuksen laskemiseksi, koska se sisältää laskentamallit CO₂-päästöjen ja investointilaskelman laskemiseksi. Pack Calculation pro-simulointiohjelma sisältää mahdollisuuden verrata eri kylmäaineella toimivien vastaavien kylmäjärjestelmien energiatehokkuuden ja hiilijalanjäljen tuloksia keskenään. Tämä mahdollistaa kylmäjärjestelmän muutoksen arvioinnin osana investointisuunnitelmaa. Danfoss käyttää työkalua muutoslaskennassa. Simulointiohjelmaa on käytetty erityisesti kaupan kylmäjärjestelmien investointien suunnittelussa [11; 12].

Kuvassa 2 on esitetty Pack Calculation pro-simulointiohjelmalla laskettu kylmäjärjestelmän vuotuinen energiankulutus käyttämällä kahta eri kylmäainetta. Samaa simulointiohjelmaa hyödynnettiin opinnäytetyössä testipenkin tulosten arvioinnissa.



Kuva 2. Pack Calculation pro-simulointiohjelman laskema kylmäjärjestelmän energiankulutus kahdelle eri kylmäaineelle testipenkissä [12].

4 Kylmäjärjestelmän sähkönkulutus

Kylmäjärjestelmien, kuten ilmastointilaitteiden ja jäähdytysjärjestelmien, sähköenergian käytön osuus maailmanlaajuisesti on merkittävä. Kansainvälisen energijärjestön (IEA) mukaan nämä kylmäjärjestelmät käyttävät noin 10 % maailman sähköenergiasta [13]. Tämä osuus voi olla suurempi kuumilla alueilla ja

kaupungeissa, joissa jäähdytyksen tarve on erityisen suuri. Jäähdytys on noin 60 % koko kylmäjärjestelmän sähkönkulutuksesta. Lisäksi kylmäjärjestelmien energian kulutuksen odotetaan kasvavan tulevaisuudessa, erityisesti kehittyvissä maissa, johtuen lisääntyvästä talouskasvusta ja ilmastonmuutoksesta [13]. Elintarvikekaupat käyttävät huomattavan osan 3–4 % yhteiskuntien tuottamasta sähköstä [13]. Kylmäjärjestelmät ovat tyypillisesti suurimmat sähkönkulutusta aiheuttavat laitteet kaupoissa. Ne käyttävät noin kolmasosan koko kaupan sähköstä [14].

Jäähdytyksen sähkönkulutuksesta Suomessa on vaikea löytää tarkkoja tilastoja. Päivittäistavarakaupan sähkönkulutus tunnetaan, mutta palveluiden ja teollisuuden sähkönkulutuksen jakaminen jäähdytykseen on haastavaa. Jäähdytystä vaativia osa-alueita ovat kodin ja kaupan kylmälaitteet, elintarvike- ja prosessiteollisuuden kylmälaitokset, jääradat, ammattikeittiöiden kylmälaitokset, pakastealtaat, kylmäkuljetuslaitteet, ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät, ajoneuvojen ilmastointilaitteet ja lämpöpumput [5].

Suomessa jäähdytyksen sähkönkulutusta ja energiatehokkuutta ei ole perinteisesti huomioitu yhtä paljon kuin lämmitystä, koska maan pohjoinen sijainti ja viileä keskilämpötila ovat vähentäneet tarvetta. Ilmaston lämpeneminen on kuitenkin lisännyt hellepäivien määrää, mikä on kasvattanut jäähdytystarvetta. Lisäksi energiatehokkuusvaatimusten kiristyminen, teknologian kehitys ja erilaisten arkkitehtonisten laitteiden yleistymisen ovat lisänneet jäähdytyksen merkitystä. Nollaenergia- ja passiivitalorakentaminen, lämpöpumppujen ja vedenjäähdyttimien käyttö sekä datakeskusten määrän kasvu ovat johtaneet jäähdytyksen kysynnän kasvuun. Näiden muutosten myötä jäähdytys on muodostunut merkittäväksi sähkönkuluttajaksi ja keskeiseksi energiatehokkuuden kehittämiskohteeksi [5].

4.1 Kotitaloudet

Kotitalouksien kylmäjärjestelmät, kuten jääkaapit ja pakastimet, ovat yleisiä. Lämpöpumput ovat yleistyneet viime vuosina. Asumisen energiankulutus

jakautuu sisätilojen ja käyttöveden lämmitykseen (noin kaksi kolmasosaa) sekä kotitalouslaitteiden sähkönkulutukseen (yksi kolmasosa). Asuminen vastaa noin 21 %:a Suomen energian loppukäytöstä vuoden 2023 raportin mukaan [15].

Kotitalouden jäähdytyslaitteet kuten lämpöpumput, jäähdytyslaitteet ovat muuttuneet yhä tehokkaimmiksi ja yleistyneet. Valmistajien kausilasketut EER-luvut ovat parantuneet vuodesta toiseen. Uusien kuluttajalaitteiden energiatehokkuusluokka merkintä on edesauttanut tehokkuuden arvostusta ja siten energiatehokkuutta. Energiatehokkuuden parantumisesta huolimatta kodin kylmälaitteet kuluttavat noin 1,7 % Suomen sähkön kokonaiskulutuksesta. LVI-laitteet, mukaan lukien jäähdyttävät ilmastointilaitteet, kuluttavat 4 % kotitalouksien sähkönkulutuksesta. Jäähdytyksen osuus on siitä pieni. Jäähdytyksen odotetaan kuitenkin yleistyvän tulevaisuudessa. Lämpöpumput valitaan lämmitysjärjestelmäksi 28 %:ssa kaikista uusista kiinteistöistä. Pääosin erillislämmityksissä lähes 1,5 miljoonaa lämpöpumppua on toiminnassa vuonna 2024. Suomessa on kokonaisuudessa 1,2 miljoonaa yksittäiskotia ja 0,5 miljoonaa vapaa-ajantaloa [16].

Kaikista kiinteistöistä lämpöpumput tuottavat 16 % kiinteistöjen kokonaislämmityksestä 14 TWH/a / vuonna 2022 [16]. Suomalaisessa kotitaloudessa sähkönkulutus ja kustannukset jakaantuvat keskimäärin näin: lämmitys 52 %, talous-sähkö 28 %, lämmin käyttövesi 20 % [17]. Erityisesti omakotitalot ja rivitalot hyödyntävät asunnoista lämpöpumppuja. Näitten asuntojen pääasiallinen lämmitysmuoto jako sähkönkäytön osalta on taulukon 1 mukainen. Taulukossa 1 on esitetty sähköllä lämmitettyjen asuntojen lämmitysmuoto lämpöpumpuilla toteuttuna [18].

Taulukko 1. Sähkölämmitteisten omakoti- ja rivitalojen osuus Suomessa 2022 [18].

Pääasiallinen lämmitysmuoto	Omakotitalo	Rivitalo
Suorasähkö	35,3 %	28,7 %
Ilmalämpöpumppu (VILP ja ILP)	10 %	3,1 %
Maalämpöpumppu	15,3 %	11,3 %

Tilaston perusteella lämpöpumput tuottavat merkittävän osan erityisesti sähkötalojen lämmitysenergiasta.

4.2 Päivittäistavarakauppa

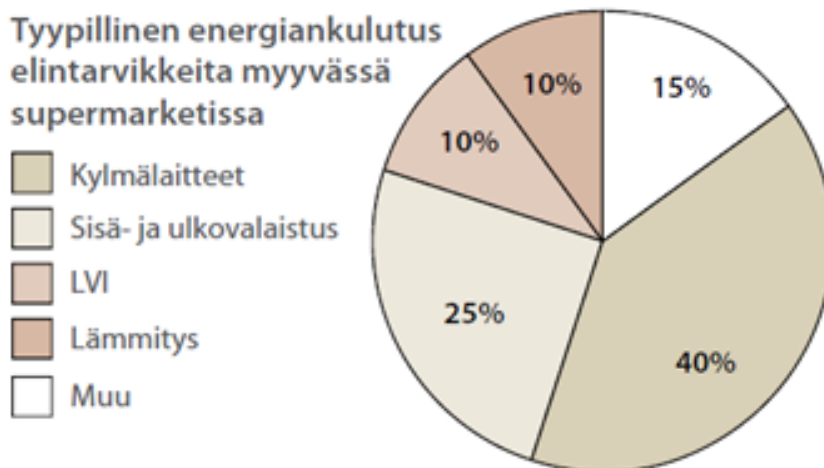
2020-luvun alussa Suomessa oli noin 2700 päivittäistavarakauppaa. Kauppojen lukumäärä on vähentynyt siitä tasaisesti, mutta vastaavasti koko kaupan myynti ja volyymi ovat kasvaneet. [19]. Kauppojen koon kasvattaminen on parantanut kaupan tehokkuutta [19].

Suomen Kylmäliikkeiden Liiton (SKLL) arvion mukaan elintarvikekauppojen kylmälaitteiden päivittäminen lähinnä hiilidioksidijärjestelmiksi EU-määräysten mukaisiksi vuoteen 2030 mennessä maksaa noin 700–800 miljoonaa euroa. Lisäksi kaupat käyttävät saman verran valaistuksen ja talotekniikan uudistamiseen sekä energiatehokkuuden parantamiseen [19]. Taulukossa 2 on esitetty eri myymälätyyppien kylmäurakoinnin kustannukset Suomessa (Päivittäistavarakauppa ry, 2019) [19].

Taulukko 2. Eri myymälätyyppien kylmäurakan kustannusarviot [19].

Kauppatyyppi	Määrä	Kylmälaitteet uusimatta	Kylmäurakan kustannusarvio (MEUR/myymälä)	Kokonaiskustannus (MEUR)
Hypermarketit	152	70 /46 %	1,0	70
Tavaratalot isot supermarketit	748	600/80 %	0,5–0,2	300
Valintamyymälät pienet supermarketit	1635	1500/92		300
Yhteensä	2535	2170/86		670

Päivittäistavarakauppojen energiankulutus vaihtelee monien tekijöiden, kuten kaupan koon, rakenteen, tyypin, asiakastiheyden, myytävien tuotteiden, liiketoimintatapojen, valaistuksen sekä LVI- ja kylmäjärjestelmien mukaan. Energian ominaiskulutus on määritetty kilowattitunteina bruttopinta-alaa kohden vuodessa. Hypermarkettien sähköenergian kulutus on yleensä 220 kWh/brm², marketeissa 320–460 kWh/brm² ja lähikaupoissa 600 kWh/brm². Suurin osa kulutusta energiasta on sähköä. Hypermarketeissa sähkö muodostaa 70 % ja lähikaupoissa 80 % energiankulutuksesta. Kylmäjärjestelmien osuus siitä on 30–60 % ja valaistuksen 15–30 % kokonaissähkökulutuksesta. LED-valaistuksen käyttö vähentää valaistuksen osuutta. Kaupan LVI-järjestelmät kuluttavat 15–25 % sähköstä. Muut kohteet, kuten toimisto- ja varastotilat, käyttävät loput [19]. Kylmälaitteiden osuus sähkökulutuksesta vaihtelee myymälätyypin mukaan: Alepa-myymälöissä noin 56 %, S-marketeissa noin 52 % ja Prismoissa noin 34 % [20]. Tyypillisessä elintarvikkeita myyvässä myymälässä energiankulutuksen jakauma on kuvan 3 mukainen [14].



Kuva 3. Kaupan myymälän energiankulutus Suomessa 2007 [14].

Suomessa on toteutettu kauppojen kylmätekniisiä parannuksia osana kaupan ilmastotoimia EU:n ilmastotavoitteiden mukaisesti [19]. Tämä uudistus on toteutettu valtiovallan ja kaupan alan yritysten välisillä energiatehokkuussopimuksilla. Sopimukset ovat keskeinen osa Suomen energia- ja ilmastostrategiaa [21].

Energiatehokkuussopimusten tavoitteena on energiansäästö ja energiatehokkuuden parantaminen. Edellisellä sopimuskaudella 2008–2016 saavutettiin lähes 16 TWh:n vuosittainen energiansäästö. Samalla vähennettiin hiilidioksidipäästöjä yli 4,7 miljoonalla tonnilla. Uusi sopimuskausi 2017–2025 kattaa kunta-alan, lämmityspolttonesteiden jakelun, kiinteistöalan ja elinkeinoelämän [22.]

Kaupan alan toimijat, kuten S- ja K-ryhmä, ovat sitoutuneet näihin sopimuksiin. S-ryhmän tavoite on säästää 87 GWh ja K-ryhmän 79 GWh vuoteen 2025 mennessä. Energiansäästötoimenpiteitä ovat muun muassa kylmäkalusteiden ovien ja kansien asentaminen, LED-valaistus, aurinkovoiman käyttö ja kylmälaitteiden etävalvonta. Sopimukseen liittyneet yritykset raportoivat vuosittain toteutetuista toimista [21].

Useita kylmäjärjestelmä investointeja on toteutettu osana energiatehokkuussopimuksia. Erityisesti kylmäjärjestelmän tuottaman lauhdelämmön hyväksikäyttö kaupan lämmitysjärjestelmässä on toteutettu useasti. Näistä hankkeista on

tehty useita opinnäytetöitä, joissa on todistettu saadut energiatehokkuus parannukset [23].

Uuden F-kaasuasetuksen myötä kaupalla on tavoitteena siirtyä luonnollisten kylmäaineitten käyttöön nopeutetussa tahdissa. Tämä tarkoittaa lisääntyviä investointeja kylmäaineen vaihtoon. Viime vuosina erityisesti suurissa kaupungeissa on muutettu kaupan kylmäjärjestelmiä hiilidioksidilla toimiviksi järjestelmäksi. Tarkkaa lukumäärää ei ole julkaistu, joten muutoksen tilasta ei ole vielä tarkkaa julkista tietoa. Ennenaikainen järjestelmämuudistus aiheuttaa yleensä alkuperäisen investoinnin toteutumalle huomattavia tappioita. Kustannuspaine voi johtaa kaupan keskittymiseen ja myymälöiden koon kasvuun.

4.3 Teollisuus

Teollisuudessa jäähdytystä tarvitaan monilla aloilla. Erityisesti tämä vaatimus on velvoittava elintarviketeollisuudessa. Kemian, öljyn, kaasun, metallin ja muovin prosessiteollisuudessa tarvitaan myös jäähdytystä. Näissä kohteissa laitteiden tehot voivat nousta megawatteihin samalla kylmäaineiden määrän ollessa tonneja. Elintarviketeollisuudessa vaadittavat olosuhteet ovat lähellä kotitalouksien jääkaappeja ja pakastimia, kun taas prosessiteollisuudessa lämpötilat voivat olla jopa alle -90 °C [5].

Vuonna 2014 elintarviketeollisuus kulutti noin 2,1 % Suomen kokonaissähkönkulutuksesta, josta kylmäntuotannon osuus oli EU-tasolla arvioiden mukaan noin 16 %, eli 0,3 % koko Suomen sähkönkulutuksesta. Muilla teollisuudenaloilla kylmäntuotannon osuuksia ei ole selvitetty [5].

Teollisuuden kylmätekniikka eroaa muista sektoreista erityisesti suurten laitospokojen ja matalien lämpötilojen vuoksi. Tärkein käytetty kylmäaine on ammoniakki (NH_3 , R717), joka soveltuu hyvin suuriin laitoksiin sen hyvien termodynaamisten ominaisuuksien, matalien kustannusten ja kotimaisen valmistuksen vuoksi. Vuonna 1995 ammoniakkilaitosten osuus Suomessa tuotetusta kylmätehosta oli noin 50 %, ja teollisuuden osuus tästä oli noin 90 %. Ammoniakin

käyttö muualla kuin teollisuudessa on harvinaista, mutta sen suosio on kasvanut kylmäaineiden käyttöä koskevien lakien kiristyessä [5].

Suomessa on toteutettu teollisuuden kylmätekniisiä parannuksia osana teollisuuden ilmastotoimia EU:n ilmastotavoitteiden mukaisesti. Tämä uudistus on toteutettu valtiovallan ja teollisuuden alan yritysten välisillä energiatehokkuussopimuksilla. Sopimusten tavoitteena on energiansäästö ja energiatehokkuuden parantaminen. Teollisuuden ilmastosopimukset, joita toteutetaan energiaselvitys mallin mukaisesti ovat tuottaneet jatkuvasti tehokkuusparannuksia [22].

Uuden F-kaasu asetuksen vaatimus muuttaa kylmäaine luonnolliseksi ei ole yhtä haastava kaupan alalla, koska näin toimivien kylmäjärjestelmien määrä on pienempi. Teollisuuden puolella ammoniakkin ja CO₂-laitosten käyttö saa jatkua kuten ennen [5; 21].

4.4 Logistiikan kylmäketju

Elintarvikkeiden kuljetuslogistiikan kylmäketju hyödyntää useita erilaisia kylmäjärjestelmiä, joista osa käyttää F-kaasuja kylmäaineena [24]. Viime vuosina CO₂-pohjaiset kuljetuskalustoratkaisut ovat yleistyneet. Myös R600-butaanin käyttö pienemmissä kuljetuskalustoissa on lisääntynyt [24].

Eryteisesti R134A ja sitä vastaavat kylmäainetta käyttävät kuljetusjärjestelmät tulevat jatkossa kielletyiksi uuden F-kaasuasetuksen kautta. Liikkuva kylmäkalusto joutuu tulevien vuosien aikana investoimaan samalla tavoin kuin kaupan ala uuteen korvaamaan kylmäkalustoon. Tämä voi aiheuttaa muutospaineita yrityksissä toteuttaa välttämättömät vaaditut uudistukset määräaikaan.

4.5 Muut kohteet

Energiankulutuksen optimointi ja jakauma on tarpeen muissa kylmäjärjestelmiä käyttävissä laitoksissa. Tästä syystä jäähalleissa ja ulkojäähentillä panostetaan energiatehokkuuteen [25]. Kaupan puolelta tuttu lauhdelämmön hyötykäyttö

muun rakennuskannan lämmittämisen on toteutettu onnistuneesti useassa kohteessa jäähallikohteessa. Lauhdutinteho saatavuus riippuu oleellisesti ulkolämpötilan vaihtelusta [27].

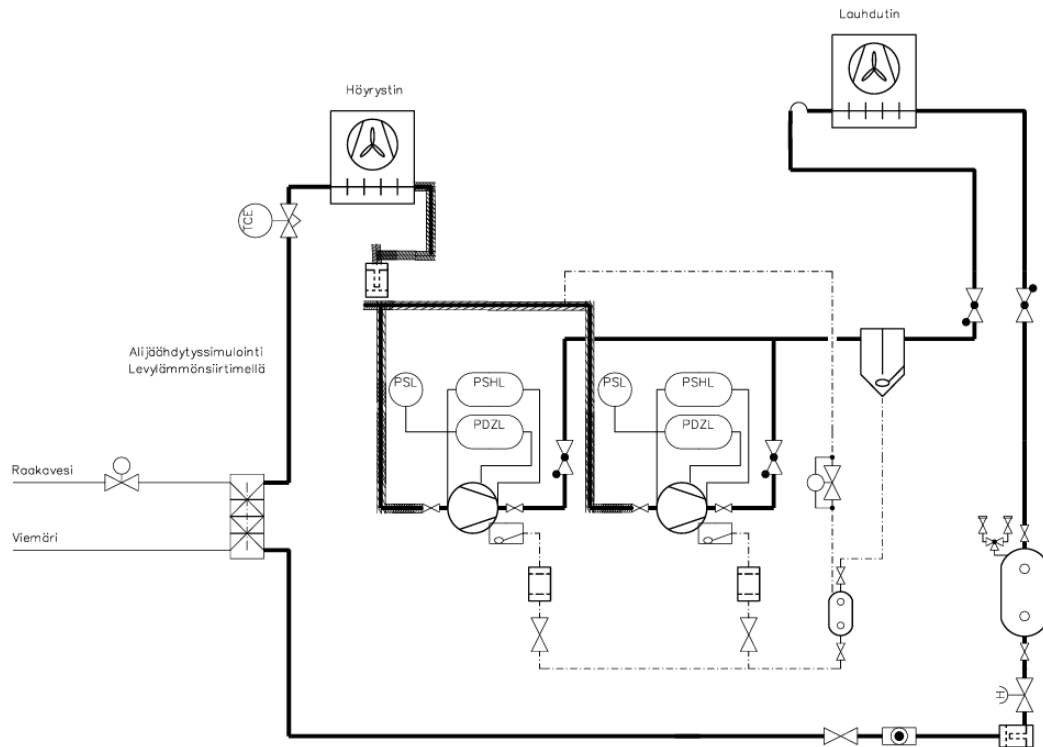
Lauhdelämmön hyödyntäminen kiinteistön lämpöenergian tuottajana onkin yleisimpiä syitä tehdä energiaremontti kylmäjärjestelmälle ennen laskettua nykyisen järjestelmän elinkaaren loppua. Motivan kehittämän KYTE-mallin mukaisissa energiakatselmoineissa on näkynyt tämä asia [28].

Kiinteistön päälämmitysmuodon vaihtaminen esimerkiksi maalämmöllä toimivaksi perustuu siihen, että nykyinen päälämmitysmuoto on öljy- tai sähkölämmitys. Kylmäjärjestelmän päivityksessä tämä päälämmitysmuodon investointipäätös on erillinen lauhdelämmön hyödyntämispäätöksestä [29].

5 Mittausjärjestelmä ja testipenkki

5.1 Testipenkki

Testattava järjestelmä oli Taitotalon Hiomotie 6:ssa sijaitseva mäntäkompressorikoneikolla varustettu kylmäjärjestelmä ja siihen liitetty kylmähuone. Kuvassa 4 on esitetty testipenkin putkikaavio komponentteineen.



Kuva 4. Kylmähuoneen testipenkin putkipiirros.

Järjestelmän koneikossa on kaksi Bitzer-kompressoria, joiden arvioitu (imupaine/lauhdutinpainne) teho on noin 2,7/3,9 kW. Kompressoreiden imupainesäädin säättää kompressorien imupainetta ohjaamalla höyrystimen kylmäaineen syöttöä elektronisen paisuntaventtiilin kautta. Järjestelmässä on puhaltimella varustettu höyrystin, jonka teho noin 2,5 kW. Järjestelmässä on myös puhaltimella varustettu ilmalauhdutin, jonka teho on noin 6 kW kokoinen. Sen lisäksi järjestelmän nestelinjaan on asennettu erillinen lämmönsiirrin. Kylmäjärjestelmään on liitetty mittauspisteitä, joiden avulla saadaan mittaamalla selville kylmäjärjestelmän energiatehokkuus myös komponentti kohtaisesti.

5.2 Mittausjärjestelmä

Climacheck lite oli valittu mittausjärjestelmä [3]. Kuvassa 5 on esitetty Climacheck lite-mittausjärjestelmälaukku.



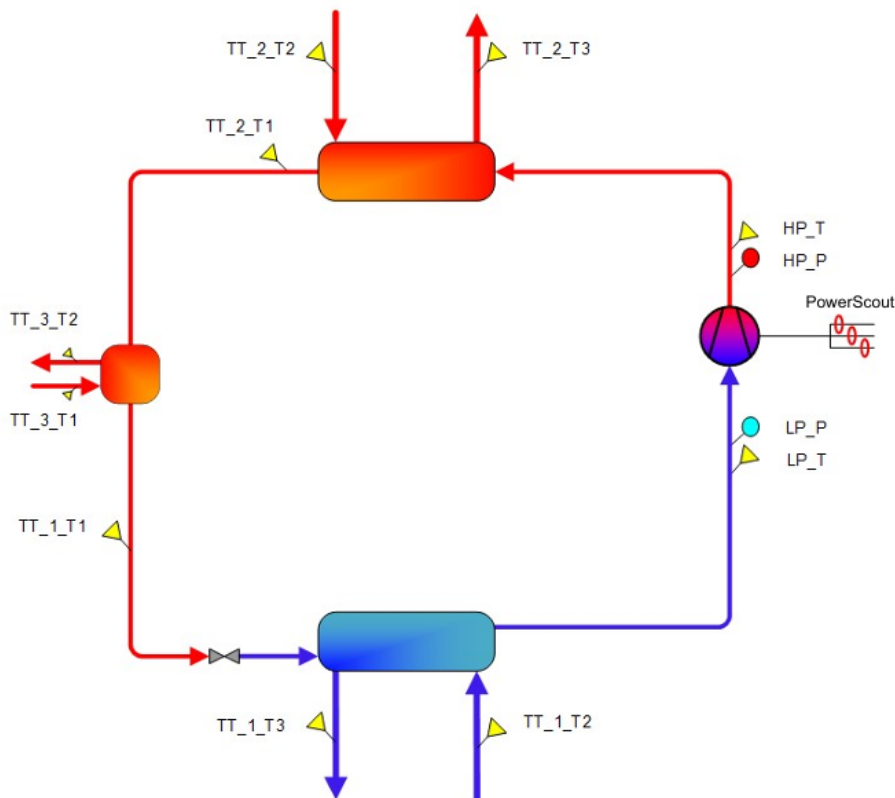
Kuva 5. Climacheck lite-mittausjärjestelmä [3].

ClimaCheck lite-mittausjärjestelmä koostuu ohjelmistosta ja antureista. Antureiden avulla liitetään halutuista kylmäjärjestelmän pisteistä lämpötila- ja painetiedot tietokoneelle, jolla Climacheck lite-mittausjärjestelmä toimii. Mittausjärjestelmä ohjaa vain yhtä kompressoria, joten testipenkin imukaasusäätimestä otettiin toisen kompressorin ohjaus pois päältä imupainesäädin asetusta muuttamalla.

ClimaCheck lite-ohjelmistossa saatavilla kymmeniä mallipohjia kaikenlaisille järjestelmä kokonaisuuksille. Testipenkkiä varten valittiin vastaava mallipohja, jonka avulla laskettiin testipenkin energiatehokkuutta. Liitteessä 4 on esitetty Climacheck lite-mittausjärjestelmän laskentamenetelmä ja menetelmään liittyvät tehokkuusmittarit.

Kuvassa 6 on esitetty testipenkkiin sopivaa mallipohja. Climacheck lite-mittausjärjestelmässä sekä lämpö- että paineanturit oli parametrisoitu vastamaan

kuvan mukaisia mittauspisteitä. Anturointi kytkettiin kuvan mukaisella tavalla. Ohjelmistossa vastaavat anturiparametrit liitettiin järjestelmän mukaiseen malliin. Järjestelmämalliin syötettiin anturoinnilla testipenkin mittaustietoa.



Kuva 6. Käytetty Climacheck lite-mittausjärjestelmän mallipohja [3].

Kompressorin lämpötila ja paine mitataan erillisillä paine- ja lämpötila-antureilla sekä ennen että jälkeen kompressorin, kuten kuvassa 6 on esitetty.

Lauhduttimelle tulevan ja lähtevän ilman lämpötilaa mitataan lämpöantureilla, samoin kuin lauhduttimen jälkeisen kylmäaineen nesteen lämpötilaa mitataan putkeen asennetulla lämpötila-anturilla. Höyrystimen tulevan ja lähtevän ilman lämpötilat mitataan lämpöantureilla. Lisäksi kylmäaineen lämpötilaa mitataan ennen paisuntaventtiiliä kylmäaineputkeen liitetyllä lämpötila-anturilla. Kylmäjärjestelmän kompressorin sähkönkulutusta mitataan virta-antureilla, jotka on liitetty kompressorin virransyöttökaapeleihin. Nämä tiedot määrittävät

järjestelmän käyntiolosuhteen. Climacheck lite-mittausjärjestelmä käyttää mallinnusta, jossa järjestelmän energiatehokkuutta arvioidaan näiden käyntiolosuhtetietojen avulla. Laskentamalli ja mallin mittareiden kuvaus on esitetty liitteessä 4.

6 Mittaukset ja analyysi

6.1 Määritetyt testisarjat

Mittauksissa testattiin ensiksi, miten kylmäaineen vaihtaminen toiseen vaikuttaa sekä järjestelmän kokonaisenergiatehokkuuteen, että pääkomponenttien omiin energiatehokkuuksiin. Näitä pääkomponentteja olivat lauhdutin, höyrystin ja kompressori.

Imupainesäädin pyrkii pitämään imupainetta vakiona. Säädin vaikuttaa osaltaan järjestelmän energiatehokkuuteen vakioimalla imupainetta, vaikka järjestelmän käyntiolosuhte vaihtelisi. Mittauksissa järjestelmäohjausta ei muutettu, joten mittaustuloksiin vaikuttivat pääasiassa kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet. Testausta varten poistettiin alussa toinen kompressori käytöstä, jotta imupaineen säädin ei ajoittaisi kompressorien keskinäistä käyntiä. Muutos vähensi imupainesäädön vaikutusta mittaustuloksiin. Mitattua järjestelmän kylmäkerrointa käytettiin hyväksi, kun verrattiin suunnittelutyökalun energiatehokkuustuloksia mittaustuloksiin.

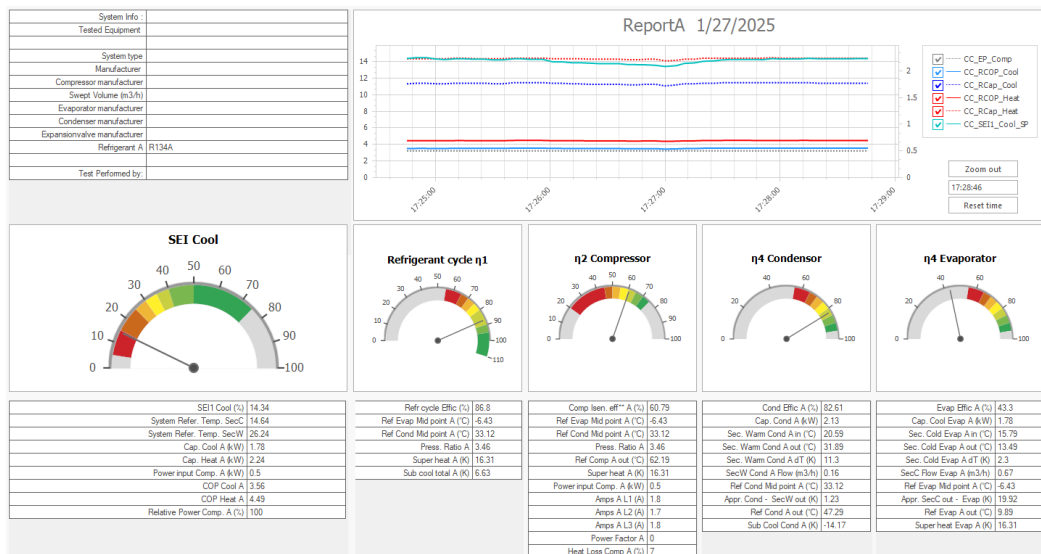
Seuraavaksi muutettiin kylmäaineen putkistovirtauksia ja lauhdutinpuhaltimen nopeuksia suunnitellusti ja mitattiin vastaavat tulokset. Tällä simuloitiin miten käyntiolosuhte muutos vaikuttaa koko järjestelmän ja komponenttien energiatehokkuuteen. Kylmäasentajien energiatehokkuuskoulutuksessa tämä tieto auttaa havainnollistamaan mitä puutteet eri komponenttien säädöissä, järjestelmän käyttöönotossa ja huollossa vaikuttavat toteutuneeseen energiatehokkuuteen.

Kyseinen testisarja suoritettiin testijärjestelmässä kahdella eri kylmäaineella. Valitut kylmäaineet olivat F-kaasut R513A ja R407C. Kylmäaineiden

termodynaamiset ominaisuudet eroavat toisistaan, mikä vaikuttaa mittaustuloksiin. Mittaukset suoritettiin ilman, että kylmäjärjestelmän asetuksia tai säätöjä muutettiin. Mittaustuloksissa näkyvät sekä kokonaisenergiatehokkuuden muutokset että komponenttikohtaiset energiatehokkuuden muutokset. Luonnollisten kylmäaineiden käyttö ei ollut mahdollista, koska järjestelmän komponentit olisi pitänyt vaihtaa kylmäaineelle sopiviksi.

6.2 Vaihdettiin kylmäaine

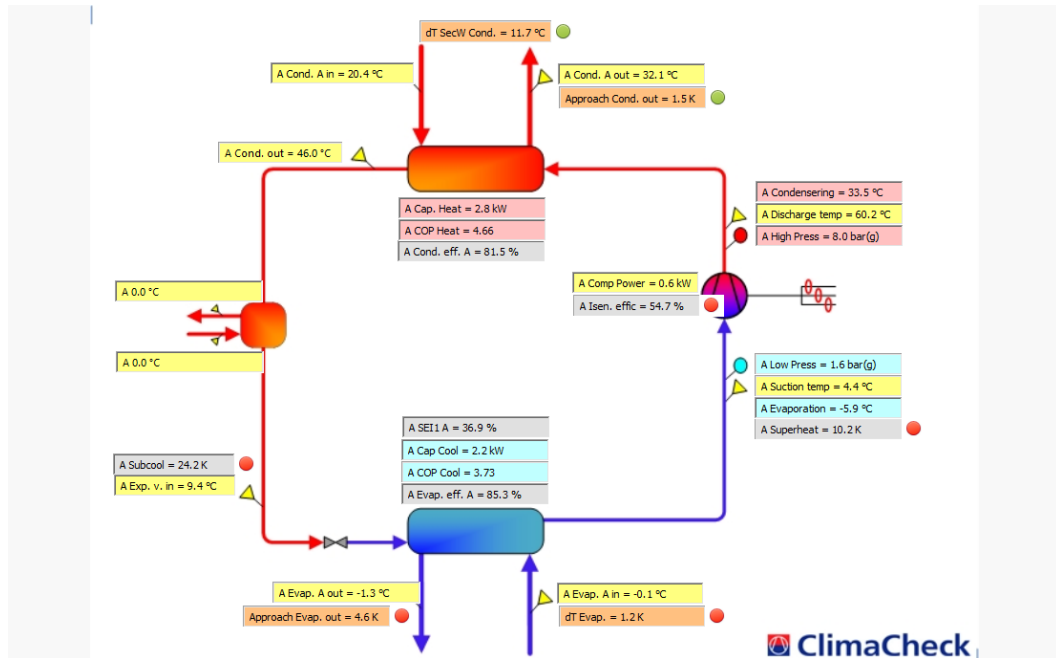
Mittauksessa mitattiin R513A ja R407C kylmäaineella järjestelmän energiatehokkuus. Mittauksia suoritettiin 3 erillistä kertaa molemmilla kylmäaineilla, jotta saadut tulokset olisivat toistettavissa ja riittävän luotettavia. Kullekin kylmäaineelle laskettiin mittaustulosten keskiarvo ja näitä keskiarvotuloksia verrattiin toisiinsa. Kuvassa 7 on esitetty kylmäaineen R513a mittaustulokset vakiojäähdytyksessä.



Kuva 7. Kylmäaineen R513a kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus vakiojäähdytyksessä.

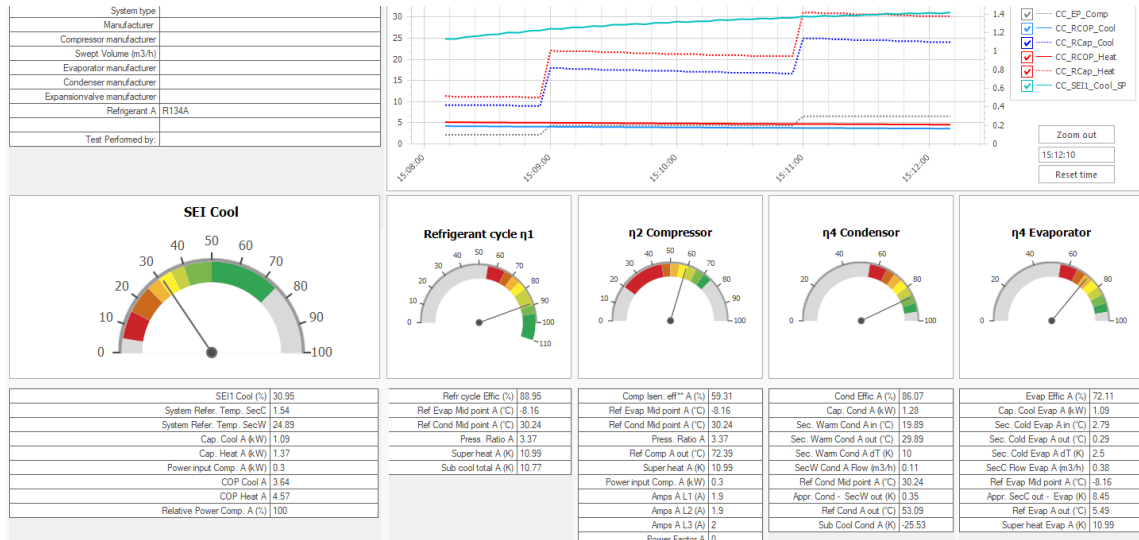
Climacheck lite-mittausjärjestelmä antaa erilaisia näyttötulosteita, joista yhdessä voidaan nähdä graafisessa muodossa kokonaisenergiatehokkuus ja komponenttikohtainen energiatehokkuus. Mittaus on selostettu liitteessä 4.

Kuvassa 8 on näkyvissä jokaisen R513a kylmäaineella testatun pääkomponentin lämpötila, sähköteho ja lasketut energiatehokkuusarvot komponenttikohtaisesti.



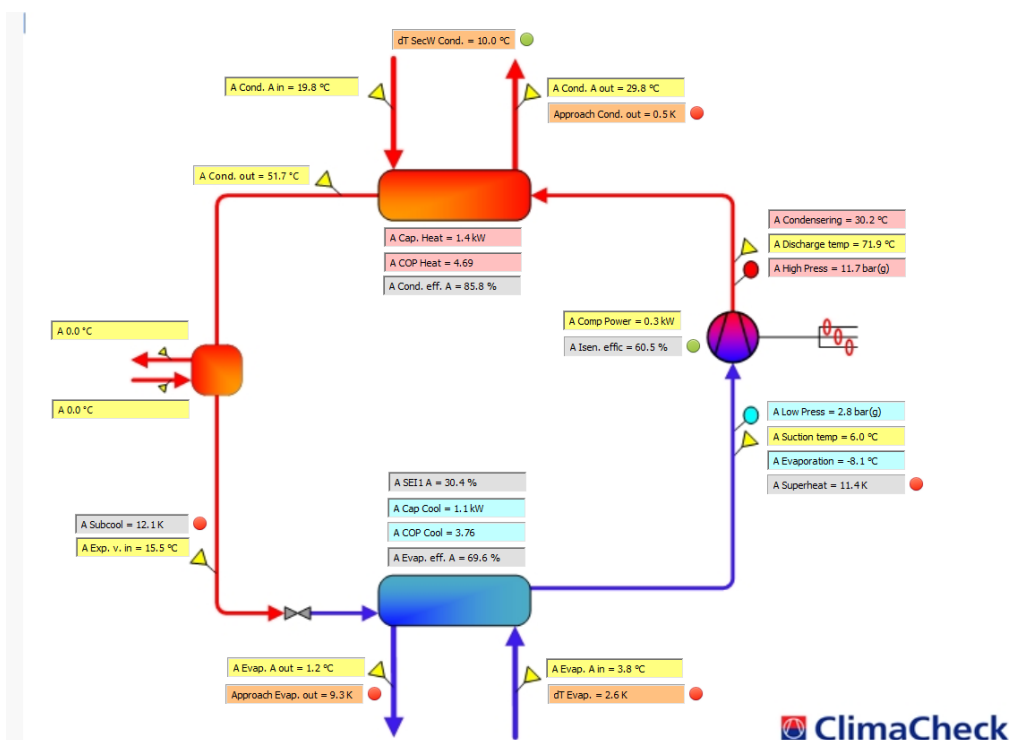
Kuva 8. Kylmäaineen R513a komponenttikohtaiset mittaustulokset vakiojäähdytyksessä.

Vastaavat mittaukset tehtiin kylmäaineelle R407c. Mittaustulokset ovat esitetty kuvassa 9 vakiojäähdytyksessä.



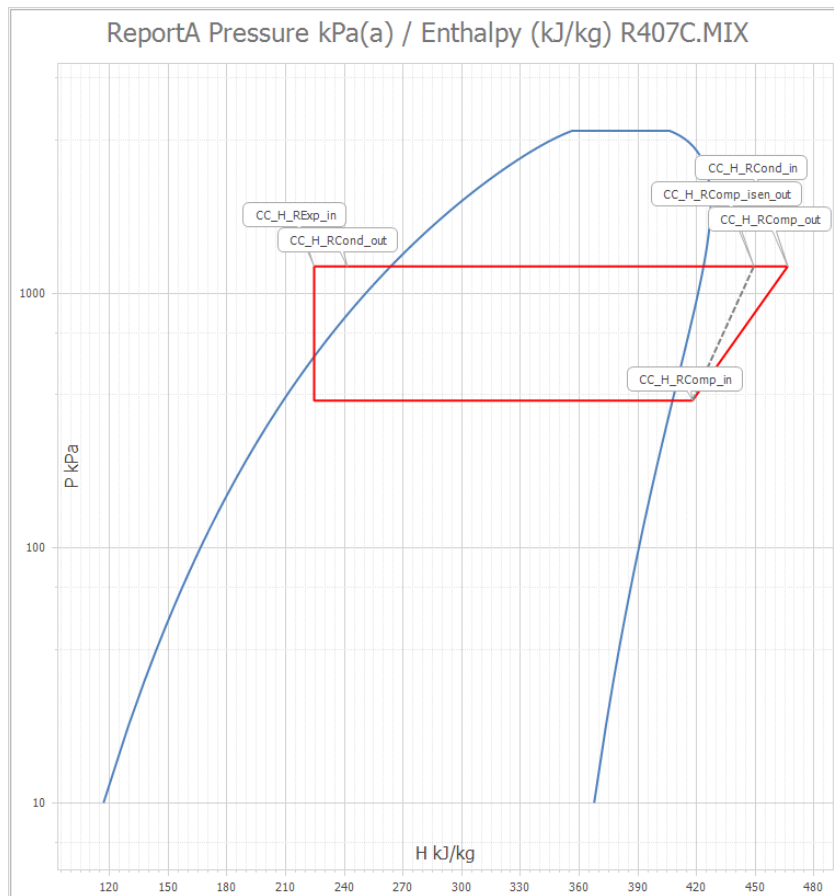
Kuva 9. Kylmäaineen R407C kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus vakiojäähdytyksessä.

Kuvassa 10 on esitetty jokaisen R407c-kylmäaineella testatun komponentin lämpötilaa, sähkötehoa ja energiatehokkuusarvoja vakiojäähdytyksessä.



Kuva 10. Kylmäaineen R407C komponenttikohtaiset mittaustulokset vakiojäähdytyksessä.

Kuvassa 11 on esitetty R407C-kylmäaineen log p, h-tilapiirros vakiojähdytyksessä.



Kuva 11. Kylmäaineen R407C log p, h -tilapiirros vakiojähdytyksessä.

Taulukossa 3 on yhteenveto energiatehokkuudet kylmäaineille R513a ja 407C. Mittaustulosten vaihteluväli oli 1–2 %, joten keskiarvot on esitetty ilman desimaaleja. Liitteessä 4 on selitetty Climacheck lite-mittausmenetelmä ja mittareitten kuvaus.

Taulukko 3. Kylmäaineiden R513a ja R407 energiatehokkuus vertailu kylmäaineen vaihdossa.

Energiatehokkuus mittaritulokset	R513A	R407C
Kylmäkierron hyötysuhde	87 %	89 %
Höyrystimen hyötysuhde	43 %	72 %
Lauhduttimen hyötysuhde	83 %	86 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde	61 %	59 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI	14 %	31 %
Jäähdytyskapasiteetti (kW)	1,8	1,1
Lämmityskapasiteetti (kW)	2,2	1,4
Sähköteho (kW)	0,5	0,3
EER kylmäkerroin	3,6	3,6
COP lämpökerroin	4,5	4,6

Tulokset osoittavat, että höyrystimen hyötysuhde vaihtelee eri kylmäaineilla. R407c hyödyntää höyrystintä tehokkaammin termodynaamisten ominaisuuksiensa ansiosta. Tämä näkyy sekä kylmäkierron että höyrystimen energiatehokkuudessa ja SEI-indeksissä. Korkeampi SEI indeksi viittaa parempaan toimivuuteen mitatuissa paine- ja lämpötila käyntiolosuhteissa. Alhainen SEI-indeksi kuitenkin kertoo, että järjestelmää tulisi optimoida. Kylmäkertoimessa ei havaittu merkittävää eroa.

6.3 Järjestelmän käyntiolosuhtemuutoksen vaikutus energiatehokkuuteen

Järjestelmällä testattiin molemmilla kylmäaineilla seuraavia toimenpiteitä:

- Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta säädettiin minimiin.
- Imuvirtausta pienennettiin vähentämällä kylmäaineen virtausta.
- Nestelinjassa avattiin lämmönsiirrin.

Näiden muutosten tarkoituksena oli arvioida, onko kylmäaineiden vaihdolla ja järjestelmän käyntiolosuhteen samanaikaisilla muutoksilla merkittävä vaikutus mitattuun energiatehokkuuteen.

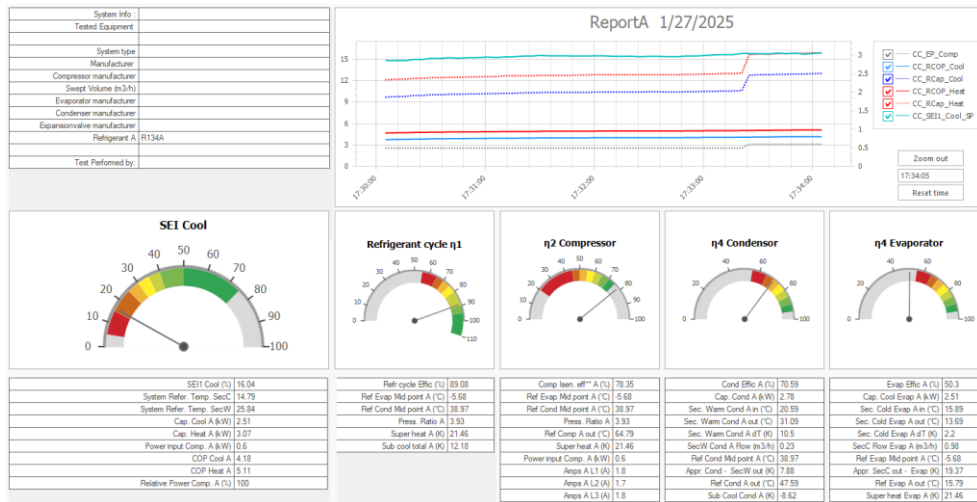
6.3.1 Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta säädettiin minimiin

Kuvassa 12 on esitetty lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeuden pienentämisen vaikutus komponenttikohtaisiin tuloksiin.



Kuva 12. Kylmäaineen R407C kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus pienentämällä puhaltimen pyörimisnopeutta vakiojäähdytyksessä.

Vastaavat mittaukset tehtiin kylmäaineelle R513a. Mittaustulokset ovat esitetty kuvassa 13 vakiojäähdytyksessä.



Kuva 13. Kylmäaineen R513c kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus pienentämällä puhaltimen pyörimisnopeutta vakiojäähdytyksessä.

Taulukossa 4 on esitetty yhteenveto kylmäaineen mukaisista lukemista taulukkomuodossa kolmella eri mittauskerralla. Saaduissa mittaustuloksissa oli 3–5 %:n vaihteluväli. Hajonnan takia keskiarvotulokset ovat 0 desimaalilla kirjattuna taulukkoon. Pyörimisnopeuden minimointi jouduttiin tekemään tyristorin käsisäätimellä. Säätimen asennosta arvioitiin puhaltimen pyörimisnopeus. Tulosta voidaan arvioida siksi ainoastaan ohjeellisena.

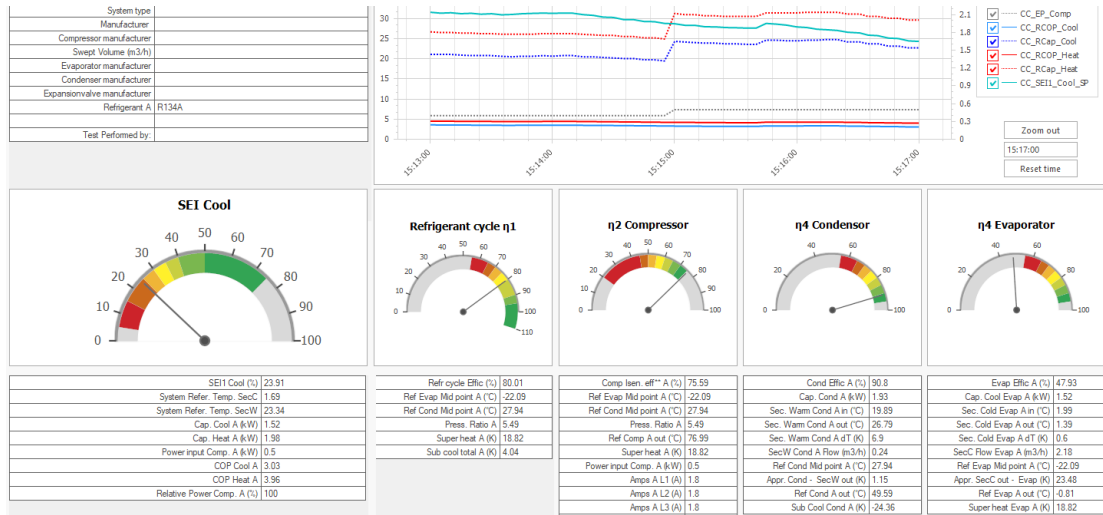
Taulukko 4. Kylmäaineiden R513a ja R407 energiatehokkuus vertailu minimoimalla lauhduttimen puhallinnopeutta vakiojäähdytyksessä.

Energiatehokkuus mittaritulokset	R513A	R407C
Kylmäkierron hyötysuhde	89 %	84 %
Höyrystimen hyötysuhde	50 %	77 %
Lauhduttimen hyötysuhde	71 %	80 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde	78 %	49 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI	16 %	24 %
Jäähdytyskapasiteetti (kW)	2,5	1,5
Lämmityskapasiteetti (kW)	3,1	2,0
Sähköteho (kW)	0,6	0,5
EER kylmäkerroin	4,2	3,0
COP lämpökerroin	5,1	4,0

Tulosten perusteella muutoksia tuli huomattavasti enemmän kuin vaihdetaan pelkästään kylmäainetta. Järjestelmän käyntiolosuhteen muutos vaikuttaa energiatehokkuuteen kokonaisuudessaan ja erityisesti komponentteihin huomattavasti. Erityisesti R407C kylmäaineella kompressorin isentrooppinen hyötysuhde tehokkuusmittari on huonompi. SEI mittarin mukaan R407C on edelleen soveltuvampi kuin R513a. Eri mittauskerroilla saatiin osin eroja toisistaan, joten tuloksen luotettavuus on epävarmempi kuin ensimmäisessä testauksessa.

6.3.2 Imuvirtauksen pienentäminen

Imupainetta pienennettiin sulkemalla imulinjan virtausta venttiilin avulla. Tällä koitetaan simuloida imusuodattimen tukkeutumaa ja sen aiheuttamaa vaikutusta energiatehokkuuteen. Virtaaman vähennys aiheutti lämpötilaeron imuputkistossa, joka oli noin 5 Kelvin asteen suuruinen. Kuvassa 14 on esitetty mittaustulos R407C kylmäaineella, kun imuvirtausta pienennetään.



Kuva 14. Kylmäaineen R407C kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus imupaineen virtaamaa pienentämällä noin 5 Kelvin astetta vakiojäähdytyksessä.

Imupainesäädin pyrkii pitämään imupaineen vakiona säätämällä elektronista paisuntaventtiiliä. Testissä pyrittiin mittamaan kuinka paljon kylmäaineesta johutuva muutos mittausten mukaan vaikuttaa energiatehokkuuteen säätimen toimiessa edelleen. Taulukossa 5 on esitetty kylmäaineiden R513a ja R407c mittaustulokset, kun vähennettiin imulinjan virtausta noin 5 Kelvin asteen verran.

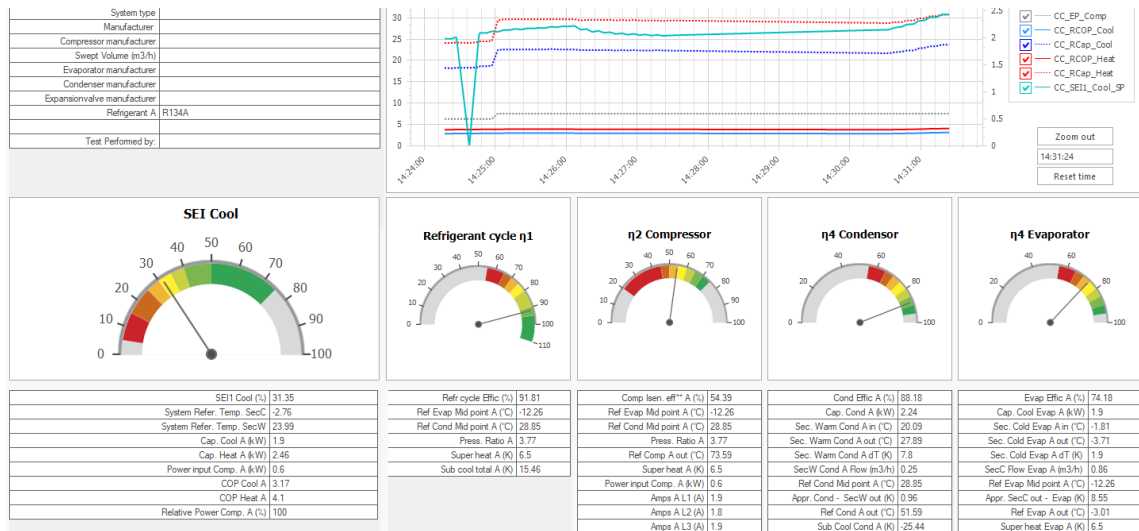
Taulukko 5. Kylmäaineiden R513a ja R407C energiatehokkuuden tulokset, kun imulinjan virtausta vähennettiin vakiojäähdytyksessä.

Energiatehokkuus mittaritulokset	R513A	R407C
Kylmäkierron hyötysuhde	87 %	80 %
Höyrystimen hyötysuhde	41 %	48 %
Lauhduttimen hyötysuhde	83 %	91 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde	68 %	76 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI	15 %	24 %
Jäähdytyskapasiteetti (kW)	2,0	1,5
Lämmityskapasiteetti (kW)	2,4	2,0
Sähköteho (kW)	0,5	0,5
EER kylmäkerroin	3,9	3,0
COP lämpökerroin	4,9	4,0

Tulosten perusteella muutoksia tuli huomattavasti enemmän kuin ensimmäisessä mittauksessa. Järjestelmän käyntiolosuhteiden muutoksen vaikutus energiatehokkuuteen kokonaisuudessaan ja erityisesti komponentteihin on huomattava. Erityisesti kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on erilainen eri kylmäaineilla. Molemmilla kylmäaineilla höyrystimen energiatehokkuus laski huomattavasti alkuperäisestä merkiten heikennystä EER:ään. Mittaus näyttää sen, että järjestelmän säädöillä ja käyntiolosuhteilla on huomattava merkitys energiatehokkuuteen. Imuvirtausta vähentämällä jäähdytyskapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin lauhdutinpuhaltimen nopeutta säätämällä. Mittaus näyttää sen, että kylmäaineen määrällä ja sen virtauksella on huomattava vaikutus energiatehokkuuteen. Virtaamat voidaan tarkistaa ja korjata normaalisti huoltotoimenpiteiden aikana optimaalisen energiatehokkuuden aikaansaamiseksi.

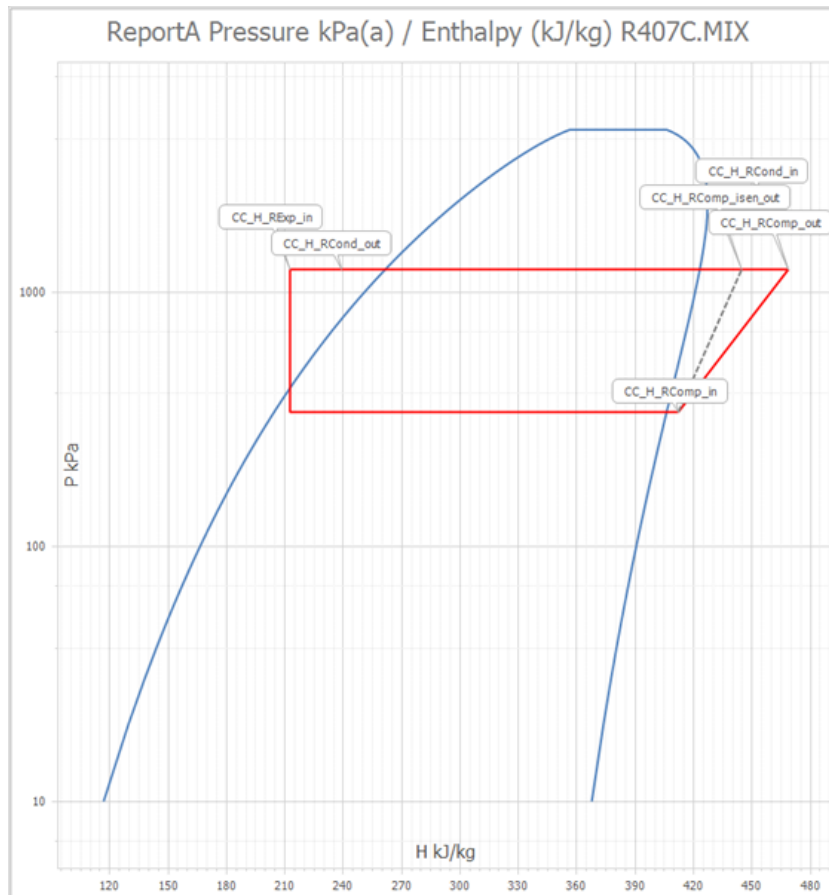
6.3.3 Lisälämmönsiirtimen käytön vaikutus

Seuraavaksi nestelinjassa avattiin lisälämmönsiirrin. Tyypillisesti tämä aiheuttaa lisääntyneen alijäähtymisen. Optimaalinen alijäähdytin lisää energiatehokkuutta. Mittauksen avulla selvitettiin, kuinka paljon eri kylmäaineilla energiatehokkuus paranee ja mihin komponenttiin tämä muutos vaikuttaa eniten. Kuvassa 15 on esitetty lämmönsiirtimen käytön vaikutus mitattuun energiatehokkuuteen R407c kylmäaineella toimivassa kylmäjärjestelmässä vakiojäähdytyksessä.



Kuva 15. Kylmäaineen R407C kokonais- ja komponenttikohtainen energiatehokkuus mittaustulos, kun lisälämmönsiirrin on käytössä.

Kuvassa 16 on esitetty R407C log p, h -tilapiirros lämminsiirtimen käytöstä. Kuvassa on esitetty höyrystimen tehokkuus lisälämmönsiirtimen ollessa toiminnassa.



Kuva 16. R407C log p, h -tilapiirros mittaustulos, kun lisälämmönsiirrin on käytössä.

Yhteenvertotaulukossa 6 esitetty R407C- ja R513a-kylmäaineilla toteutetut mittaustulokset, kun nestelinjassa avattiin lisälämmönsiirrin.

Taulukko 6. Kylmäaineiden R407C ja R513a energiatehokkuus tulokset lisälämmönsiirrin käytössä.

Energiatehokkuus mittaritulokset	R513A	R407C
Kylmäkierron hyötysuhde	96 %	92 %
Höyrystimen hyötysuhde	50 %	74 %
Lauhduttimen hyötysuhde	80 %	88 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde	68 %	54 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI	20 %	31 %
Jäähdytyskapasiteetti (kW)	2,6	1,9
Lämmityskapasiteetti (kW)	3,1	2,5
Sähköteho (kW)	0,6	0,6
EER kylmäkerroin	4,3	3,2
COP lämpökerroin	5,2	4,1

Tulosten perusteella energiatehokkuus parani alkuperäisistä tuloksista. Alijäähdytymisen lisääminen vaikuttaa parantavasti energiatehokkuuteen myös komponenttitasolla. Erityisesti R513a kylmäaineella suhteellinen mittaustulosten parantaminen on nähtävissä. Kylmäaineiden termodynaamisten eroavaisuuksien vuoksi kompressorin isentrooppinen hyötysuhde on erilainen. Molemmilla kylmäaineilla SEI-indeksi kasvoi alkuperäisestä. Voidaan todeta, että alijäähdytystä kannattaa lisätä energiatehokkuuden parantamiseksi.

6.3.4 Saatujen mittaustulosten erojen arviointi

Edellisissä osioissa arvioitiin kylmäjärjestelmän tilan ja säätöjen vaikutusta energiatehokkuuteen eri kylmäaineilla. Tuloksista laadittiin laskentataulukoita, jotka vertailivat tilojen muutoksia energiatehokkuuteen.

Taulukossa 4 on yhteenveto tuloksista, kun järjestelmän lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta pienennettiin. Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto, kun

järjestelmän imuputken virtaamaa pienennettiin. Taulukossa 6 on esitetty yhteenveto tuloksista, kun nestelinjaan lisättiin lisälämmönsiirrin. Laskelmien solujen laskettu luku saatiin, kun alkuperäisen tilan mittaustiedosta vähennettiin säädetyn tilan mukainen mittaustieto. Taulukossa 7 esitetty energiatehokkuuden erojen suuruus, kun lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta pienennettiin alkuperäisestä.

Taulukoissa näkyy huomattava ero tuloksissa eri kylmäaineilla mitattuina. SEI-indeksin mittaustulos muuttuu käyntiolosuhteiden muuttuessa. Tämä johtuu ensisijaisesti kylmäaineen soveltuvuudesta kylmäjärjestelmän käyntiolosuhteisiin ja eri komponenteilla käytettäväksi. Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeuden pienentäminen parantaa R407C kylmäaineen osalla isentrooppista hyötysuhdetta alkuperäisestä. Tämä selittyy sillä, että kylmäaineen vaihto edellyttää yleensä lauhdutinpuhaltimen pyörimisnopeuden säätämistä kylmäaineelle sopivaksi. Taulukossa 7 on esitetty erot prosentteissa alkuperäisiin käyntiolosuhteisiin molemmilla kylmäaineilla.

Taulukko 7. Lasketut erot alkuperäiseen tilaan kylmäaineilla R513a ja R407C lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeuden pienentyessä.

Energiatehokkuus mittaritulokset ero	R513A	R407C
Kylmäkierron hyötysuhdekerroin muutos	-2 %	5 %
Höyrystimen hyötysuhdekerroin muutos	-7 %	-5 %
Lauhduttimen hyötysuhdekerroin muutos	12 %	6 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhdekerroin muutos	-17 %	10 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI muutos	-2 %	7 %
Jäähdytyskapasiteetti muutos	-0,73	-0,42
Lämmityskapasiteetti muutos	-0,83	-0,61
Sähköteho muutos	-0,1	-0,2
EER kylmäkerroin muutos	-0,62	0,61
COP lämpökerroin muutos	-0,62	0,61

Taulukossa 8 on esitetty energiatehokkuuden muutos, kun imulinjan virtaamaa pienennettiin. Tämä muutos simuloi esimerkiksi imusuodattimen tukkeutumista, joka aiheuttaa eron eri kylmäaineilla. Muutokset näkyvät erityisesti kompressorin isentrooppisessa hyötysuhteessa ja höyrystimen energiatehokkuudessa, ja muutos on erilainen eri kylmäaineiden kohdalla. Virtaaman pieneneminen vaikuttaa SEI-indeksiin ja isentrooppiseen kylmäkertoimeen. Tämä tarkoittaa, että kylmäainetta vaihdettaessa pitää säätää paisuntaventtiilin tulistusta ja imupainesäätimen tasoa sopivaksi.

Taulukko 8. Lasketut erot alkuperäiseen käyntiolosuhteeseen R513a ja R407C vähennettäessä virtaamaa 5 Kelvin asteen verran.

Energiatehokkuus mittaritulokset ero	R513A	R407C
Kylmäaineen hyötysuhdekerroin muutos	0 %	9 %
Höyrystimen hyötysuhdekerroin muutos	2 %	24 %
Lauhduttimen hyötysuhdekerroin muutos	0 %	-5 %
Kompressorin isentrooppinen hyötysuhdekerroin muutos	-7 %	-17 %
Järjestelmätehokkuus indeksi -SEI muutos	-1 %	7 %
Jäähdytyskapasiteetti muutos	-0,18	-0,43
Lämmityskapasiteetti muutos	-0,18	-0,61
Sähköteho muutos	0,00	-0,20
EER kylmäkerroin muutos	-0,36	0,61
COP lämpökerroin muutos	-0,36	0,61

Kylmäpiirin komponenttien energiatehokkuus muuttuu, kun käyntiolosuhteet ja säädöt vaihtuvat. Osittain tämän muutoksen suuruus johtuu testatun kylmäaineen termodynaamisista ominaisuuksista muuttuneissa käyntiolosuhteissa. Tulostestien perusteella energiatehokkuuden optimointi osoittautuu haastavaksi, ja vakioituneen energiatehokkuuden ylläpitäminen vaikeutuu järjestelmän käyntiolosuhteiden muutosten takia.

Climacheck lite-mittausjärjestelmän laskentamallin tarkkuus on esitetty liitteessä 4. Siten laskennan tulokset ovat suuntaa antavia.

Taulukossa 6 esitetty alijäähdyttämisen hyödyllisyys lisälämmönsiirtimellä tehtynä. Erot ovat selkeät alkuperäiseen tilanteeseen. Alijäähdyttäminen parantaa yleensä energiatehokkuutta.

6.4 Suunnittelutyökalun ja energiatehokkuusmittausten välinen ero

Pack Calculation pro-simulointiohjelmaa [12] käytetään yleisesti kylmäjärjestelmän suunnittelutyökaluna, kun halutaan arvioida samalla laskea mitä on suunnitellun kylmäjärjestelmän energiatehokkuus ja sen aiheuttama hiilijalanjälki.

Tutkimuksessa verrattiin Climacheck lite-mittausjärjestelmällä mitattuja energiatehokkuuden tuloksia suunnittelutyökalun antamiin tuloksiin. Tutkimuksella haluttiin selvittää ovatko suunnittelutyökalujen antavat tulokset samansuuntaisia kuin mittaustulokset. Samalla selvitettiin ja kuinka tarkasti suunnittelutyökaluun pitää asettaa kohdejärjestelmän mukaiset parametrit, jotta sen antama tulos on lähellä mittaustulosta.

Simulointiohjelmaan asetettiin vastaavanlainen järjestelmä kuin testipenkki, kuva 6. Saatuja tuloksia verrattiin 2 eri kylmäaineella R513a ja R407C. Analyysissä selvitettiin tulosten eroja erityisesti kylmäaineen suhteen.

Simulointiohjelmassa valittiin vastaava kompressori, höyrystin ja lauhdutin kuin testipenkissä. Jokaiselle komponentille määritettiin staattiset parametrit, jotka vastaavat testipenkkiä. Kompressorin isentrooppiseksi hyötysuhteeksi laitettiin energiatehokkuusmittauksista saatu mitattu tulos. Kuvassa 17 on esitetty Pack Calculation pro-simulointiohjelman laskema energiankulutus kylmäaineille R513a ja R407c.

Month	kylmähuone			R407C		
	Compressor [kWh]	Fans and Pumps [kWh]	Total [kWh]	Compressor [kWh]	Fans and Pumps [kWh]	Total [kWh]
January	20,9	0,5	21,4	19,5	0,5	20,0
February	11,5	0,3	11,7	10,7	0,3	10,9
March	33,2	0,9	34,1	30,9	0,9	31,8
April	103,0	3,0	106,0	96,0	3,0	99,0
May	261,2	9,6	270,8	243,6	9,4	252,9
June	385,6	15,9	401,5	359,5	15,5	375,0
July	457,5	21,4	478,9	426,5	20,7	447,3
August	428,0	19,4	447,4	399,1	18,8	417,9
September	321,1	11,5	332,6	299,4	11,2	310,6
October	203,2	6,2	209,4	189,4	6,1	195,5
November	93,6	2,5	96,1	87,3	2,5	89,8
December	33,8	0,8	34,6	31,5	0,8	32,3
Total	2 352,7	91,9	2 444,6	2 193,5	89,6	2 283,1
Average	196,1	7,7	203,7	182,8	7,5	190,3

Kuva 17. Pack Calculation pro-simulointiohjelman laskema energiankulutus kylmäaineille R513a ja R407c.

Työkalulla laskettu energiankulutus perustuu vakioituun arvioon järjestelmän toiminta-ajasta. Ohjelmiston ohjeen mukaan 34 % ajasta järjestelmä on käynnissä ja 66 % ajasta jäähdytys ei ole käynnissä. Vuodessa on 8760 tuntia, joten järjestelmä on käynnissä keskimäärin 2978 tuntia. Tämän tiedon avulla järjestelmälle laskettiin kylmäkerroin. Suunnittelutyökalun laskelman kylmäkerroin korreloi Climacheck lite-mittausjärjestelmällä hetkellisesti mitattujen tulosten kanssa. Ne eroavat kuitenkin tasoiltaan toisistaan. Tasojen erilaisuus johtuu sekä järjestelmän toiminta-asetusten ja toimintatilojen erilaisuudesta että osittain puutteellisista komponenttitiedoista, joita käytettiin simulointiohjelmassa. Kuvassa 18 esitetty simulointiohjelman kylmäkerroimen tulos vakioiduissa olosuhteissa ja vakioidulla käyttöajalla laskettuna.

	kylmähuone (reference)	R407C
Load fulfilment		
% of time:	100,0%	100,0%
% of energy:	100,0%	100,0%
COP		
Average System COP (COSP) [-]:	2,08	2,22
Energy delivered:		
Total [kWh]:	5 073	5 073
Energy consumption		
Pumps and fans [kWh]:	92	90
Compressor [kWh]:	2 353	2 193
Total [kWh]:	2 445	2 283
Savings		
Yearly energy savings [kWh]:	-	161
Yearly energy savings [%]:	-	6,6%

Kuva 18. Pack Calculation pro -simulointiohjelman laskema keskimääräinen kylmäkerroin ja energiankulutus kylmäaineille R513a ja R407c.

6.5 Työkalujen energiatehokkuustulosten vertailu

Climacheck lite-mittausjärjestelmä antaa energiatehokkuustuloksen sen hetkestä järjestelmän käyntiolosuhteista. Mittausten ajankohta vaikuttaa merkittävästi tulokseen. Pack Calculation pro-simulointiohjelma laskee keskimääräistä energiatehokkuutta vakioidussa olosuhteessa. Saatuja tuloksia ei voi suoraan vertailla keskenään, koska ne perustuvat eri määrittelyihin. Energiatehokkuus riippuu kylmäaineesta, sen määrästä, käyntiolosuhteista ja komponenttien säädöistä. Järjestelmän käyntiolosuhteen muutokset vaikuttavat energiatehokkuuden tasoon huomattavasti enemmän kuin simulointiohjelmat laskevat tulokseksi.

7 Yhteenveto

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavat käyntiolosuhteet. Climacheck lite-mittausjärjestelmän tulokset osoittavat, että käyntiolosuhteiden

muuttuminen vaikuttaa energiatehokkuuteen eri kylmäaineilla eri lailla. Kylmäaineen vaihto toiseen muuttaa komponenttien lämpö- ja painetiloja, vaikka järjestelmän säädöt pysyisivät samoina. Tämä vaikuttaa mitattuun energiatehokkuuteen. Climacheck-mittausjärjestelmän tulokset, erityisesti SEI-indeksi, olivat mitauksissa alhaisia. Tämä viittaa siihen, että järjestelmän komponenttien koko on tarkistettava ja käytetyt säätimet säädettävä kylmäaineelle sopivalle tasolle. SEI-indeksin mataluuden vuoksi tämä on suositeltu toimenpide (liite 4).

Tutkimuksessa testattiin komponenttien säätöjen ja käyntiolosuhteiden muutosten vaikutusta energiatehokkuuteen. Kyseisillä muutoksilla on merkittävä vaikutus saatuihin energiatehokkuustuloksiin. Testipenkin tulokset osoittivat, että SEI-indeksi mittari laski oleellisesti alkuperäisistä tuloksista. Järjestelmän ollessa optimaalisessa tilassa SEI-indeksi on normaalisti huomattavasti korkeampi. Tulokset osoittavat, että komponenttien, säätimien, kylmäainevirtaamien ja -määrän säätäminen ja huolto ovat välttämättömiä optimaalisen energiatehokkuuden saavuttamiseksi.

Tutkimusten mukaan kylmäjärjestelmän käyntiolosuhteet ja kylmäaineesta johtuvat komponenttivalinnat vaikuttavat energiatehokkuuteen. Yksiselitteistä vastausta energiatehokkuuden muutoksen suuruudesta kylmäainevaihdon yhteydessä luonnollisiin kylmäaineisiin ei ole selkeästi esitettävissä [31]. Kylmäainevaihdon ja järjestelmämuutosten jälkeen on suotavaa tehdä energiatehokkuusmittaus asian tarkistamiseksi [31].

Testipenkkiin asennettu imupainesäädin ja elektroninen paisuntaventtiili vakioivat imupainetta käyttöolosuhteissa. Näiden säätimien säätöjä ei muutettu, vaikka järjestelmän käyntiolosuhteita muutettiin eri testiajoissa. Käytännössä kylmäaineen vaihdon yhteydessä imukaasusäätimen parametrit tulee säätää kylmäaineelle sopiviksi energiatehokkuuden optimoimiseksi. Yhteenvedona kylmäaineen vaihtaminen vaatii aina järjestelmän uudelleen säätämisen, jotta kullekin kylmäaineelle asetettu sopiva. Tutkimus korosti kylmäjärjestelmän asetusten merkitystä muutosten ja huollon yhteydessä.

Kylmäjärjestelmän simulointityökalut voivat antaa samansuuntaisia tuloksia kuin energiatehokkuutta mittaavat ohjelmat, jos kaikki energiatehokkuuteen liittyvät kylmäjärjestelmän tiedot ovat parametrisoitu ja asetettu oikein simulointityökaluun. Usein miten näin ei ole. Kylmäjärjestelmän toimittajan tulee mitata toteutuksen energiatehokkuus, korjata puutteet ja verrata tulosta suunniteltuun, jotta toteutus olisi suunnitellun mukainen. Viime aikoina asiakkaille on tarjottu maksullista järjestelmä uudistusta palveluna. Palveluun kuuluu luvattu energiatehokkuus yhtenä osana. Energiatehokkuuden pitäminen optimaalisena vaatii säännöllistä mittausta.

Climacheck lite-mittausjärjestelmä tuottaa havainnolliset ja tarkat tulokset. Kylmäasentaja koulutuksessa on hyödyllistä käyttää näitä järjestelmiä, jotta energiatehokkuuden parannustoimenpiteet voidaan esittää oppimistilanteessa. Kylmäjärjestelmän energiatehokkuustutkimuksen tulokset parantavat kylmäasentajien koulutusta, joka alkaa syksyllä 2025. Tämän tutkimuksen tietoja hyödynnetään koulutuksessa.

Lähteet

- 1 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2024/573. annettu 7 päivänä helmikuuta 2024, fluoratuista kasvihuonekaasuista, direktiivin (EU) 2019/1937 muuttamisesta ja asetuksen (EU) N:o 517/2014 kumoamisesta. Verkkoaineisto. EU-Lex. <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32024R0573&qid=1716890415511/>>. Luettu 10.07.2024.
- 2 Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi ympäristönsuojelulain muuttamisesta. Verkkoaineisto. Finlex. <<https://finlex.fi/fi/hallituksen-esitykset/2024/102?language=fin/>>. Luettu 30.01.2025.
- 3 Climacheck lite. Verkkoaineisto. Climacheck. <<https://home.climacheck.com/solutions/climacheck-lite/>>. Luettu 15.02.2025.
- 4 Hakala, Pertti & Kaappola, Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3., uudistettu painos. Tampere: Suomen yliopistopaino.
- 5 Rinne, Niklas. 2017. Kylmäaineen kontaminoitumisen vaikutus kylmäkonejärjestelmän energiatehokkuuteen ja toimivuuteen. Diplomityö. Aalto-yliopisto, insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.
- 6 Puroviita, Timo. 2018. Data centereiden monipuoliset jäähdytysratkaisut. Verkkoaineisto. Kylmäextra. <<https://kylmaextra.fi/teemat/data-centereiden-monipuoliset-jaahdytysratkaisut/>>. Luettu 25.03.2025.
- 7 Kaappola, Esko; Hirvelä, Aulis; Jokela, Matti & Kianta, Jani. 2022. Kylmätekniikan perusteet. 10., uudistettu painos. Turenki: Hansaprint Oy.
- 8 Lane, Anna-Lena; Benson, Jessica; Eriksson, Lina; Fahlén Per; Nordman, Roger; Stignor Haglund, Caroline; Berglöf, Klas & Hundy, Guy. Method and guidelines to establish System Efficiency Index during field measurements on air conditioning and heat pump systems. 2014. Rapport. Energi-myndigheten: <<https://home.climacheck.com/wp-content/uploads/2022/06/EP18-Slutrapport-20140630rev0704.pdf/>>. Luettu 26.03.2025.
- 9 SFS käsikirja: 65–1:2022. osa1 kylmälaitteet. Suomen standardisointiliitto.
- 10 Saheb, Yamina; Sulejman, Becirspahic & Simon, Jérôme. 2006. Effect of the Certification on Chillers Energy. Verkkoaineisto. <https://web.archive.org/web/20120321093214/http://www.eurovent-certification.com/fic_bdd/pdf_fr_fichier/1150796026_Review_85_-_Effect_of_Certification.pdf/>. Luettu 10.03.2025

- 11 Hedberg, Kasper. Johtava kylmäteknikka asiantuntija, Danfoss Suomi, Helsinki. Sähköposti- ja puhelinkeskustelu 03.06.2024.
- 12 Pack calculation Pro. IPU. Verkkoaineisto. <<https://www.ipu.dk/products/pack-calculation-pro/>>. Luettu 07.08.2024.
- 13 Energy Efficiency 2024. IEA. Verkkoaineisto. <<https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018/>>. Luettu 15.09.2024.
- 14 Hedberg, Kasper. Energiaoptimointi, Kaupan kylmä. Koulutusopas. Luettu 03.06.2024.
- 15 Finland 2023, Energy Policy Review. IEA. Verkkoaineisto. <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/07c88e41-c17b-4ea1-b35d-85dff665de4/Finland2023-EnergyPolicyReview.pdf/>>. Luettu 10.08.2024.
- 16 Hirvonen, Jussi. 2023. Finland's Country report for IEA TCP HPT. Suomen lämpöpumppuyhdistys. Verkkoaineisto. <https://drive.google.com/file/d/12R0qyd_tju53O-_Q9Uvbc2Ei-WRj42ZXW/view/>. Luettu 12.08.2024.
- 17 Sähkönkulutus. 2025. Vattenfall. Verkkoaineisto. <<https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/>>. Luettu 08.08.2024.
- 18 Kotitalouksien kulutus. 2022. Tilastokeskus. Verkkoaineisto. <<https://stat.fi/julkaisu/cktwror9c4ee10b618t3njtsh/>>. Luettu 10.07.2024
- 19 Niemelä, Oona. 2019. Energiatehokkuuden parantaminen päivittäistavara-kauppojen kylmäjärjestelmien uusimisen yhteydessä. Diplomityö. LUT University. LUTPub-tietokanta.
- 20 Päivittäistavara kauppa 2024. Päivittäistavara kauppa ry. Verkkoaineisto. <<https://www.ptv.fi/wp-content/uploads/2024/06/Paivittaistavara-kauppa-ry-2024.pdf/>>. Luettu 04.01.2025.
- 21 Kiuru, Tomi. Johtava energian asiantuntija, Motiva. Sähköpostikeskustelu 22.05.2024.
- 22 Energiatehokkuussopimukset. Motiva. Verkkoaineisto. <<https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiatehokkuussopimukset/>>. Luettu 15.07.2024.
- 23 Tapio, Ville. 2020. Kaupan kylmäjärjestelmän sähköinen huipputeho (CO₂-booster). Insinööritö (YAMK). Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

- 24 The World's 5 Most Commonly Used Refrigeration Systems for Refrigerated Vehicles. 2021. Guchen thermo. Verkkoaineisto. <<https://www.guchenthermo.com/company-news/refrigerated-vehicle-refrigeration-systems.html/>>. Luettu 15.07.2024.
- 25 Mikkola, Sakari. 2019. Ulkotekojään energiajärjestelmä. Lämpöpumpauksen mitoitus. Insinööri (AMK). Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 26 Aittomäki, Antero. 2012. Kylmäteknikka. 4.; uudistettu painos. Porvoo: Bookwell Oy.
- 27 Lautiainen, Katja. 2018. Energiajäähallin energiatehokkuuden kehittäminen. Diplomityö. LUT University. LUTPub-tietokanta.
- 28 Energiakatselmustoiminta. Energiavirasto. Verkkoaineisto. <<https://energiavirasto.fi/energiakatselmukset/>>. Luettu 10.08.2024
- 29 Yrjänä, Lotta. 2021. Liikennemyymälän energiatehokkuushanke, Opinnäytetyö. Insinööri (AMK). Satakunnan ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 30 Shubham, Soni; Punit, Mishra; Govind, Maheshwari & Devendra, S. Verma. 2022. Comparative energy analysis of R1234yf, R1234ze, R717 and R600a in Vapour Compression Refrigeration system as replacement of R134a. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785322015449/>>. Luettu 25.09.2024
- 31 Berglöf, Klas. Climacheck R&D Manager. Climacheck, Ruotsi. Sähköpostikeskustelu 26.03.2025.
- 32 Zhaohua, Li a.; Hanying, Jianga; Xinwen, Chen & Kun, Liang. 2019. Comparative study on energy efficiency of low GWP refrigerants in domestic refrigerators with capacity modulation. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778818336946/>>. Luettu 25.09.2024.
- 33 Paranna lauhduttimen energiatehokkuutta Retrofit-puhaltimella. EB-MPAPST. Esite. Luettu 15.10.2024.
- 34 Lappeteläinen, Timo. 2021. Hukkalämmön hyödyntäminen kaupan kiinteistöissä – parhaat käytännöt saneerauskohteissa. Insinööri (YAMK). Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 35 Rakennusten energiatehokkuusdirektiivi EPBD, ajankohtaiskatsaus. 2024. Rakennusteollisuus. Verkkoaineisto. <<https://rt.fi/wp->

- content/uploads/2024/12/EPBD-ajankohtaiskatsaus-5-12-2024.pdf/>. Päivitetty 29.11.2024. Luettu 10.1.2025.
- 36 Haukås, Hans. 2016. CO₂ [R744] kylmäaineena. Helsinki: Suomen Kylmäliikkeiden Liitto ry (SKLL).
- 37 Alijoki, Tapio; Pulkki, Laura & Puputti, Timo. 2022. Ammoniakki kylmäaineena Turvallisesti. Helsinki: Suomen Kylmäliikkeiden Liitto ry (SKLL).
- 38 Hydrocarbon refrigerants. 2022. IIFIIR. Verkkoaineisto. <<https://iifiir.org/en/encyclopedia-of-refrigeration/hydrocarbon-refrigerants/>>. Päivitetty 22.06.2022. Luettu 26.9.2024.
- 39 Choudhari, C S & Sapali, S N. 2017. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. Verkkoaineisto. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217301066/>>. Luettu 1.10.2024.
- 40 Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database. NIST. Verkkoaineisto. <<https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop/>>. Luettu 13.03.2024.
- 41 Coolselector2. Danfoss. Verkkoaineisto. <<https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/>>. Luettu 10.02.2025.

Liitteet

Liite 1: Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden kirjallisuuskooste

Liite 2: Kylmäjärjestelmän hyödyntäminen kiinteistön energiantuotannossa

Liite 3: Kylmäaineiden ilmastovaikutus ja energiatehokkuuden laskenta

Liite 4: Climacheck lite-mittausjärjestelmän energiatehokkuuden laskentamalli

Liite1: Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden kirjallisuuskooste

Järjestelmän suunnittelussa tehdään joskus virheitä, joiden vaikutus koko järjestelmän energiatehokkuuteen voi olla huomattava. Samoin asennuksessa ja erityisesti huollossa aiheutetut puutteet asetuksissa ja aiheuttavat energiatehokkuuden häviöitä.

Identifioidut kylmäjärjestelmän energiatehokkuuden häviöt [4]

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavat moninaiset kylmäpiirin häviöt. Häviöitä aiheutuu monista asioista kuten [4]:

- järjestelmän suunnittelun puutteet
- kylmäpiirin tukkeutumat
- ilma-aukkojen tukkeutumat, lämmönvaihtimien viat
- komponenttien ohjaus puutteista ja virheistä
- ympäristön olosuhteiden muutoksista suhteessa suunniteltuun. Eri-tyisesti lauhduttimen teho riippuu ympäristön muutoksista.
- komponenttivioista ja -kulumista
- imulinjan eristyksen puutteista ja vioista
- kylmäaine vuodoista ja väärin täytöistä
- kylmäöljyn määrän ja laadun heikkeneminen.

Aiheutuneet häviöt mitataan usein lämpötilamuutoksina ennen ja jälkeen komponentista tai osasta. Kirjallisuuden mukaan noin 1 asteen lämpötilaero putkiston lauhdutinlinjassa aiheuttaa noin 2–3 % energiatehokkuuden kokonaishäviön [4].

Energiatehokkuuteen vaikuttavat järjestelmän säätimien asetukset ja toiminnan tila. Monet säätimien perusasetukset vaikuttavat myös energiatehokkuuteen.

Tällaisia säätimen asetuksia ovat [14]:

- Ohjaussäätimien parametriasetukset ja niiden sallitut raja-arvot, sallittu toiminta-alue.

- Hälytysasettelut ja hälytysprioriteetit, viestien reititys ja kuittaus, toiminnan seuranta.
- Kompressorin käynti ja käynnistyksen asetukset.
- Sulatusasetukset.

Kylmäjärjestelmien energiatehokkuuskoulutuksessa tähdennetään usein säätimien parametrien tarkistamista, säätämistä asennus- ja huoltokäyntien yhteydessä [4; 11].

Suunnitteluvaiheen energiatehokkuus vaatimukset on kuvattu Kylmälaitoksen suunnittelu oppikirjassa [4]. Lainausta kylmäjärjestelmän suunnittelu kirjasta.

Kylmälaitoksen suunnittelussa ratkaistaan suurin osa energiatalouden vaikuttavista tekijöistä, joten kylmäsuunnittelijan tulisi olla mukana jo esisuunnitteluvaiheessa. Tämä mahdollistaa kylmälaitteiden oikean sijoittelun, riittävien tilojen varaamisen ja putkimatkojen minimoinnin, mikä vähentää painehäviöitä. Lauhduttimen oikea sijoituspaikka vaikuttaa lauhtumislämpötilaan ja energiankulutukseen. Säilytys-, jäähdytys- ja pakastustilat tulisi suunnitella todellisten tarpeiden mukaan, jotta ilma kiertää tehokkaasti ja ilman ylijäähdytys vältetään. Tämä lyhentää jäähtymis- ja pakastumisaikaa ja pienentää energiankulutusta. Lauhtumislämmön hyödyntäminen voi lisäksi säästää lämmitysjärjestelmän hankintakustannuksissa

Oikein mitoitettut lämmönsiirtimet vähentävät tuotehävikkiä ja tuovat säästöjä. Kylmälaitoksen energiankulutuksen kannalta tärkeimpiä tekijöitä ovat automaatio ja säätö.

Järjestelmän puutteellinen mitoitus voi johtua monestakin asiasta. Järjestelmää suunnittelun tilanteessa suunnittelun ymmärrys järjestelmän ympäristöstä ja kylmätehon tarpeesta voi olla puutteellinen. Ympäristö voi myös muuttua alkuperäisestä ja siten toimitettu, että järjestelmä voi olla väärin mitoitettu. Kustannuspaineet voivat myös vaikuttaa suunniteltuun järjestelmän energiatehokkuuteen. Komponenttien hinnoittelu vaikuttaa järjestelmän energiatehokkuuteen koska yleisesti asiakas valitsee edullisimman ratkaisun.

Putkiston koko ja imulinjan eristyksen riittävyys vaikuttaa hinnoitteluun. Erityisesti nestelinjan putken halkaisija valitaan usein valinta työkalun pienimmästä päästä eikä suinkaan suurimmasta päästä valinta haarukkaan kuten energiatehokkuuden kannalta olisi suotavaa. Alimitoitettu nesteputki aiheuttaa häviöitä, jotka erityisesti vaikuttavat kylmäaineen höyrystymiseen ennen paisunta venttiiliä.

Paisuntaventtiili teho voi vähentyä huomattavasti suunnitellusta, jos kylmäaine höyrystyy ennen paisuntaventtiiliä.

Kylmäsäilytystilojen vaikutus energiankulutukseen on kuvattu kirjassa Kylmälaitoksen suunnittelu oppikirjassa [4]. Lainaus kylmäjärjestelmän suunnittelu kirjasta.

Kylmätilan lämpötilan oltava riittävän korkea, jotta lämpötilaero ympäristön välillä on mahdollisimman pieni. Tämä vähentää kylmätehon tarvetta. Matalampi sisälämpötila kuin optimaalinen taas heikentää kompressorin hyötysuhdetta ja lisää energiankulutusta.

Kylmätilan ilmanvaihdon on oltava mahdollisimman pieni. Koneellinen ilmanvaihto määräytyy viranomaismääräysten ja varastoitavien tuotteiden vapauttamien kaasujen mukaan. Koneellinen ilmanvaihto kannattaa varustaa kylmän talteenotolla ja/tai tuloilman jäähdytyksellä pienentääksesi lämpö- ja kosteuskuormaa. Painovoimainen ilmanvaihto kannattaa minimoida käyttämällä hyvin soveltuvia ovia ja ilmapirtauksen estolaitteita, kuten koneovia, suikaleverhoja ja nopeasti sulkeutuvia verhoja.

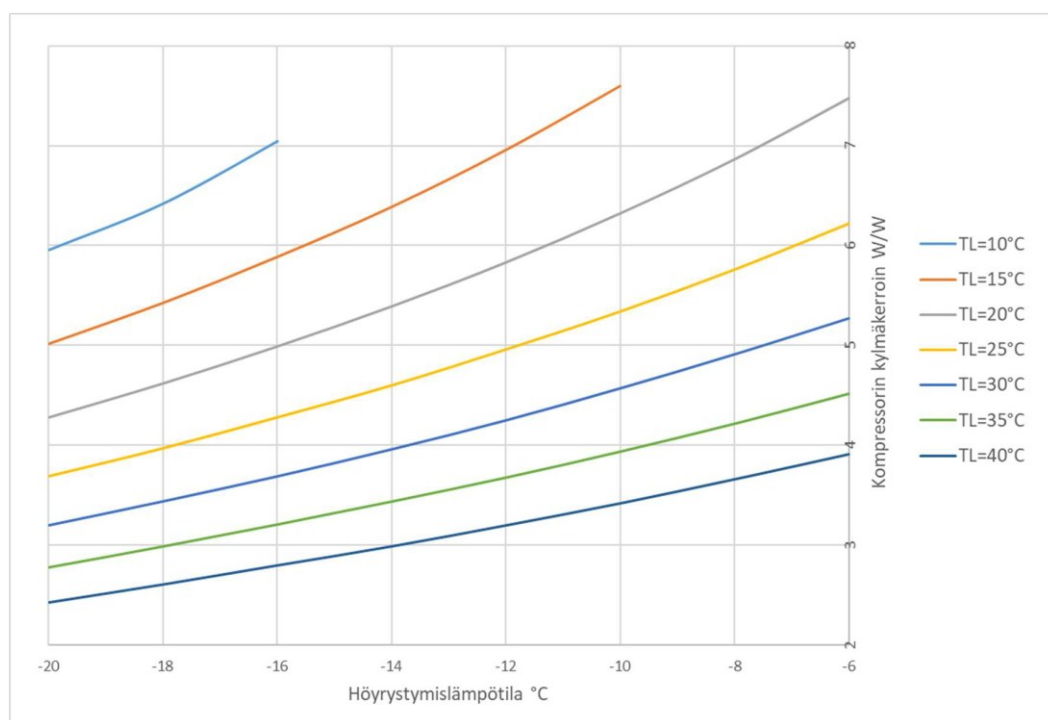
Kylmätilan valaistuksen kannattaa olla optimaalinen. Ledivalojen käyttö ja niiden optimaalinen sijoittaminen vaikuttaa myös energiatehokkuuteen. Valot kannattaa sammuttaa automaattisesti vähentääksesi valaistuksen aiheuttamaa lämpökuormaa.

Kylmätilojen höyrystimet kannattaa valita oikean kokoisina tilan jäähdytystarpeen mukaan. Höyrystimen puhaltimet ja puhallinmoottori kannattaa valita mahdollisimman vähän energiakuluttavina. Höyrystimen kannattaa sijoittaa siten, että ilmankierto on hyvä ja jäätyminen mahdollisimman vähäistä. Höyrystimen sulatuksen kannattaa säätää optimaaliseksi ja valita mahdollisimman vähän energiaa kuluttava ratkaisu.

Kylmä- ja pakkastilat on tarkoitettu valmiiksi jäähdytettyjen ja pakastettujen tuotteiden säilyttämiseen, ei niiden jäähdyttämiseen tai pakastamiseen. Tuotteet kannattaa sijoittaa tiloihin oikein huolehtien niiden tehokkaasta järjestelystä.

Ympäristölämpötilan vaikutus energiatehokkuuteen

Kylmäkertoimeen vaikuttavat oleellisesti järjestelmän toimintalämpötilat. Sakari Mikkolan Ulkotekojään energiajärjestelmä opinnäytetyössä [25]. Energiatehokkuus laskettiin vertailemalla järjestelmän lauhtumis- ja höyrystymislämpötilojen avulla kylmäkerrointa. Ulkotekojään kyseessä ollessa lauhtumislämpötila on suoraan verrannollinen ulkolämpötilaan [25]. Kuvassa 1 on näkyvissä höyrystymislämpötilan ja ulkolämpötilan yhteinen vaikutus verrattuna saatuun kompressorin kylmäkertoimeen [25].



Kuva 1. Höyrystymis- ja ulkolämpötilan vaikutus kompressorin kylmäkertoimeen [25].

Tutkimuksen mukaan toimintalämpötilojen eron kasvaessa kompressorin otto-teho suurenee, mikä johtaa kylmäkertoimen pienenemiseen. Kirjallisuudessa esitetty laskentakaava on seuraavanlainen. 1 K nousu höyrystymislämpötilassa tai 1 K lasku lauhtumislämpötilassa parantaa kylmäkerrointa noin 3 % [4].

Eristämisen vaikutus energiatehokkuuteen

Kylmälaitoksen osien eristys parantaa laitoksen tehokkuutta ja vähentää energiahäviöitä. Sopivan eristemateriaalin ja paksuuden valinta pienentää lämpöhäviöitä putkistoissa ja komponenteissa, vähentää energiankulutusta sekä suojaa laitteistoa korroosiolta, pidentäen sen käyttöikä.

Kylmälaitoksen eristämisessä kosteuden hallinta on olennaista. Kosteus heikentää eristemateriaalia, lisää lämmönsiirtoa ja aiheuttaa korroosiota, mikä nostaa energiankulutusta ja ylläpitokustannuksia. Siksi höyrytiivis materiaali on suositeltavaa. Taulukossa 1 on esitetty yleisimpien eristemateriaalien lämmönjohtavuus. Huolellisen asennuksen tulee estää kosteuden pääsy.

Kylmälaitoksen eristäminen voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin energiatehokkuuden näkökulmasta [25]:

- Taloudellinen eristys pyrkii tasapainottamaan kustannukset ja energiansäästöt. Energiahäviöitä voi vähentää lisäämällä eristepaksuutta tai valitsemalla tehokkaamman materiaalin. Liian paksu eristys nostaa hankinta- ja asennuskuluja, joten optimointi huomioi energiankulutuksen ja investointikustannukset.
- Prosessieristämisen tavoite on varmistaa, että prosessin sisältämä aine pysyy halutussa lämpötilassa. Energiatehokkuuden kannalta tämä tarkoittaa, että eristys mitoitetaan niin, ettei tarpeetonta lämmönsiirtoa tapahdu. Tämä voi johtaa lisäkuormitukseen kylmälaitteistolle ja lisätä siten energiankulutusta.
- Kastepiste-/hikoilueristäminen estää kosteuden tiivistymisen putkien ja komponenttien pinnoille kylmälaitoksissa. Jos kosteutta kertyy, eristyskyky heikkenee, lämmönsiirtokerroin kasvaa ja energiankulutus lisääntyy. Eristys mitoitetaan niin, että putken pintalämpötila on aina kastepistettä korkeampi, mikä estää kondensoitumista ja parantaa energiatehokkuutta.

Energiahäviöiden minimoimiseksi eristyksen tulee olla riittävän paksu tai tehokkaasta materiaalista. Paksuus lisää hankinta- ja asennuskustannuksia, joten eristys optimoidaan kustannusten ja energiahäviöiden mukaan [25].

Taulukko1. Eri eristeiden lämmönjohtavuus.

Keski- lämpötila °C	Lasivilla	Vuori- villa	Poly- styreeni	Poly- uretaani	Solu- kumi
10	0,033	0,032	0,034	0,038	0,037
-10	0,03	0,032	0,031	0,035	0,035
-30	0,028	0,03	0,029	0,032	0,033
-50	0,026	0,029	0,027	0,029	0,029
Tiheys (kg/m ³)	30	60	25	35	70

Putken eristepaksuuden vaikutus putken lämpöhäviön voidaan arvioida kaavan 1 avulla [25]

$$\phi_p = \frac{\pi \cdot (t_u - t_s)}{\frac{1}{\alpha_s \cdot d_s} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_u}{d_s}\right) + \frac{1}{\alpha_u \cdot d_u}} \quad (1)$$

Kaavan parametrit on selitetty seuraavasti:

- t_u on ulkolämpötila (K).
- λ on eristeen lämmönjohtavuus (W/mK).
- α_s on sisäpuolen lämmönsiirtokerroin (W/m²K).
- α_u on ulkopuolen lämmönsiirtokerroin (W/m²K).
- d_s on eristeen/putken sisähalkaisija (m).
- d_u on eristeen/putken ulkohalkaisija (m).
- d_{ue} on eristeen ulkohalkaisija (m).
- d_{se} on eristeen sisähalkaisija (m).

Putken eristepaksuutta lisäämällä saadaan minimoitua lämpöhäviöitä [25].

Öljynpitoisuuden vaikutus energiatehokkuuteen

Kompressorin voiteluaine on välttämätön kompressorin toiminnan kannalta. Ilman voiteluainetta kompressorin liikkuvien osien välinen kitka kuluttaisi osat rikki taikka synnyttäisi haitallista lämmöntuotantoa. Lopputuloksena järjestelmän energiatehokkuutta heikentyy ja käyttöikä lyhenee. Kompressorityypeistä lähes kaikki vaativat öljyä toimiakseen luotettavasti. Ainoa poikkeus on magneettilaa-kereilla toimiva turbokompressor, joka kelluvan akselinsa ansiosta ei tarvitse voitelua kitkan vähentämiseksi.

Voiteluaineella on useita tärkeitä tehtäviä energiatehokkuuden kannalta [5]:

- Vähentää kitkaa ja kulumista, joka pienentää energiankulutusta.
- Auttaa kompressorin jäähdytyksessä, joka estää ylikuumentumisen ja parantaa siten hyötysuhdetta.
- Tiivistää sisäisiä vuotoja, joka parantaa kompressorin suorituskykyä.
- Kuljettaa vuodonilmaisuaineen mahdollisiin vuotokohtiin, mikä helpottaa järjestelmän ylläpitoa ja vähentää energiahukkaa.

Vaikka voiteluöljy on kompressorille välttämätön, se voi haitata kylmäkonejärjestelmän energiatehokkuutta. Kompressorista pääsee aina jonkin verran öljyä putkistoon, mikä voi heikentää lämmönsiirtokykyä ja lisätä energiankulutusta. Öljypitoisuuden kasvaessa yli 1 %, lämmönsiirto heikkenee merkittävästi. Yli 5 %:n öljypitoisuus voi tehdä vaikutuksesta huomattavan. Joskus noin 2 %:n öljypitoisuus on parantanut lämmönsiirtoa, mutta tämä ei ole yleistä [5].

Öljyn määrän lisääntyminen kylmäaineessa kasvattaa kylmäaine-öljyseoksen viskositeettiä. Suurempi viskositeetti heikentää kylmäaineen kiertoa ja lämmönsiirtoa, mikä laskee järjestelmän hyötysuhdetta. Öljyn korkea kiehumispiste nostaa kylmäaine-öljyseoksen yhteistä kiehumispistettä, mikä vaikuttaa kylmäaineen höyrystymiseen ja jäähdytystehoon [5].

Kylmäkonejärjestelmissä tulee estää voiteluöljyn leviäminen. Öljynerottimien käyttö on ratkaisevaa energiatehokkuuden kannalta, vähentäen kompressorista lähtevän öljyn määrän 0,5–3 %:iin. Tehokas öljyn palautus kompressorin on

tärkeää, jotta öljy ei haittaa järjestelmän toimivuutta. Alhainen öljypitoisuus ehkäisee lämmönsiirron heikentymistä [5].

Rinteen diplomityössä kuvattiin mikä on eri öljynmäärien vaikutus koelaitoksen energiatehokkuuteen R404 ja R134a kylmäaineella. Saadut tulokset olivat taulukon 2 mukaisia [5].

Taulukko 2. Öljypitoisuuden prosentuaalinen vaikutus COP-arvoon kylmäaineilla R404 ja R134a [5].

Öljyä	R404	R134a
0 %	0,00 %	0,00 %
2 %		4,1 %
4 %		4,6 %
6 %	2,87 %	3,2 %
8 %		4,9 %
9 %	4,75 %	
10 %		6,7 %
11 %	5,14 %	

Tuloksista voidaan nähdä energiatehokkuuden vähenevän, kun öljypitoisuus lisääntyy kylmäaineessa.

Ylimääräisten lauhduttamattomien kaasujen vaikutus energiatehokkuuteen

Lauhtumattomat kaasut heikentävät kylmäkoneen suorituskykyä ja lisäävät energiankulutusta. Nämä kaasut eivät tiivisty nesteeksi lauhduttimessa, mikä vähentää lämmönsiirtoa ja nostaa painetta järjestelmässä ennen paisuntaventtiiliä.

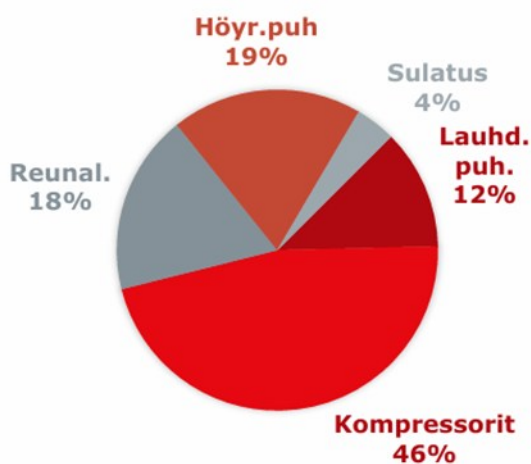
Paineen nousu vaikuttaa suoraan järjestelmän energiatehokkuuteen eri tavoilla [5]:

- Kompressorin paineen nosto lisää sähkönkulutusta, mikä on ongelma, jos sen tehoa ei voi säätää.
- Lauhtumattomat kaasut aiheuttavat lämpövastusta lauhtuttimessa, estäen tehokkaan lämmön siirtymisen. Tämä pakottaa kompressorin nostamaan tuotettua painetta korkeammalle, heikentäen sen hyötysuhdetta.
- Painepuolen lämpötilan nousu voi ylikuormittaa laitteiston ja lyhentää käyttöikä.

Niklas Rinteen diplomityön [5] mukaan pieni määrä ilmaa (noin 1,5 % mooliosuus) kylmäkonejärjestelmässä voi vähentää kylmäkerrointa noin 10 %.

Kylmäjärjestelmän komponenttien vaikutus energiatehokkuuteen

Kylmäjärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavat eri komponentit merkittävästi. Energiatehokkuuden parantamisessa tulee keskittyä kylmäpiirin tärkeimpiin osiin ja häviöihin. Tyypillisen kylmäjärjestelmän energiakulutus jakaantuu seuraavan kuvan 2 mukaan [14].



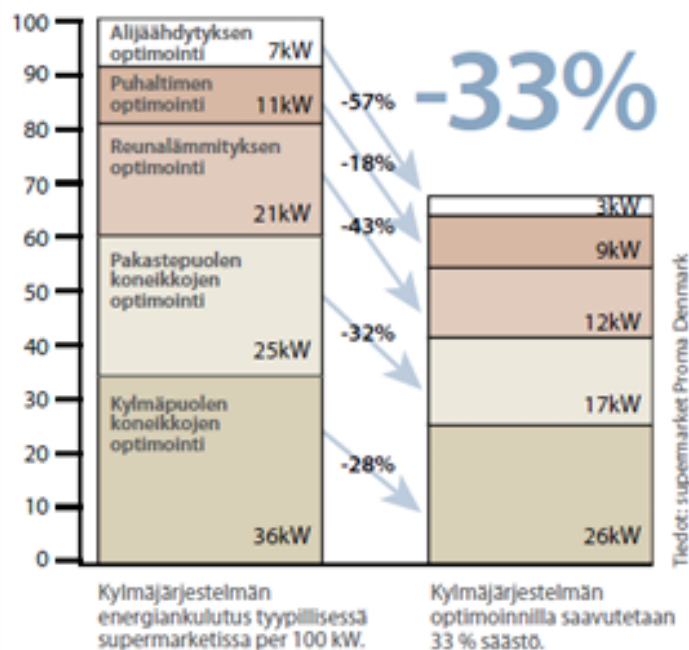
Kuva 2. Kaupan komponenttien energiankulutuksen jako [14].

Kylmäjärjestelmän sähköä eniten kuluttavat kompressorit, joiden osuus on lähes puolet kokonaiskulutuksesta. Muita suuria kuluttajia ovat höyrystimien puhaltimet ja reunavastukset. Lauhduuttimien puhaltimet ja sulatukset muodostavat viidenneksen kulutuksesta. Komponenttien valinta ja säädöt voivat vähentää sähkökustannuksia [11; 14].

7.1 Komponenttien optimoinnin vaikutus energiatehokkuuteen

Valitsemalla komponentit huolellisesti ja optimoimalla niiden säädöt, voidaan saavuttaa tarkka lopputulos ja parantaa energiatehokkuutta jopa 33 % [14]. Suurissa järjestelmissä, kuten teollisuuden ja kaupankylmäjärjestelmissä, tämä optimointi voi tuoda merkittäviä taloudellisia säästöjä [14]. Kylmäjärjestelmän säästöpotentiaali on esitetty kuvassa 3 [14].

Kylmäjärjestelmän energiansäästömahdollisuus käytettäessä ADAP-KOOL järjestelmää



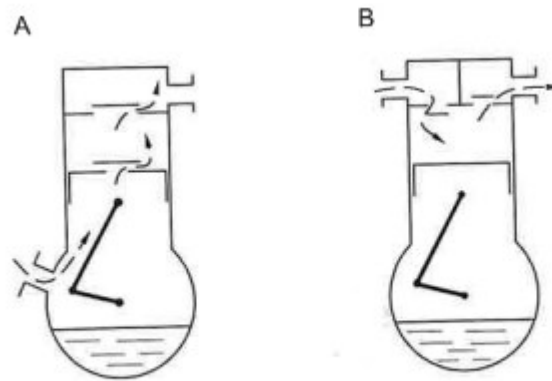
Kuva 3. Kylmäjärjestelmän energiankulutuksen pienentämismahdollisuudet [14].

Eri kompressorityyppien energiatehokkuus vertailu

Kompressorit kuluttavat yleensä kylmäjärjestelmän energiankulutuksesta jopa 46 % [14]. Optimaalinen kompressorivalinta ja asianmukainen ohjaus voivat merkittävästi parantaa kylmäjärjestelmän energiatehokkuutta. Yleisimmät kompressorityypit ovat mäntä-, ruuvi-, turbo-, scroll- ja kiertomäntäkompressorit [26]. Näiden toiminnallinen ja rakenteellinen eroavaisuus vaikuttaa niiden energiatehokkuuteen. Kompressoria valittaessa tulee huomioida sen käyttökohde ja vaadittava tehovaihtelu, koska kompressorin energiatehokkuus vaihtelee käytön ja kuormituksen mukaan [26]. Kompressorit on asennettu koneikkoon, jossa niiden käyttö voidaan optimoida esimerkiksi jaksottamalla tai portaattomasti säätämällä. Näin saavutetaan kulloinkin tarvittava kylmäteho [23].

Mäntäkompressorit

Mäntäkompressoria käytetään tyypillisesti pienten ja keskikokoisten kylmäjärjestelmien kompressorina. Kompressorin rakenteessa männät liikkuvat sylintereissä edestakaisin puristaen kylmäainetta. Mäntäkompressorissa jää sylinterikannen, venttiilin ja männän väliin haitallinen tila. Tähän tilaan jäänyt puristettu kylmäainehöyry paisuu männän palautuessa takaisin. Haitallinen tila aiheuttaa hyötysuhteen alenemisen verrattuna muihin kompressorityyppeihin. Kuvassa 4 on esitetty mäntäkompressorin leikkauskuva, josta nähdään haitallinen tila venttiilikannen ja venttiilien välissä [26].



Kuva 4.9. Venttiilien sijoitusperiaatteet. A yhdensuuntaisvirtaus, B vaihtovirtaus.

Kuva 4. Mäntäkompressorin läpileikkauskuva [26].

Mäntäkompressorin hyötysuhde on usein tasainen laajalla osakuorma-alueella. Tällöin voidaan kytkeä yksittäisiä sylintereitä pois päältä tarvittaessa. Kompressorin sopii laajalle käyttöalueelle ja korkeisiin puristussuhteisiin. Kompressorin mekaanisesti melko yksinkertainen. Siinä on tosin liikkuvia osia, joten sen huoltotarve on kohtuullinen. Kompressorityypin isentrooppinen hyötysuhde voi laskea kulumisen takia, jos männän sisäiset vuodot ja venttiilivälilykset eivät ole optimaalisia [32].

Ruuvikompressorin

Ruuvikompressorin käytetään yleensä keskikokoisten ja suurten kylmälaitteiden kompressorina. Kompressorin rakenteessa on kaksi ruuvimaisesti hammastettua akselia, jotka pyörivät vastakkain puristaen kaasun. Kompressorin hyötysuhde on täyskuormalla hyvä, mutta osakuormilla se vaihtelee säätötavan mukaan [26]. Tämä kompressorityyppi soveltuu teollisuuteen, jossa tarvitaan tasainen ja suuri jäähdytysteho. Tyypillisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi teollisuuskylmälaitokset ja suuret kaupalliset kylmälaitteet, joissa täyttä kuormaa olevat ajot ovat yleisiä [4].

Scroll-kompressori

Scroll kompressoria käytetään tyypillisesti pieni ja keskikokoisten kylmäjärjestelmien kompressorina. Kompressorin rakenteessa on kaksi spiraalia, joista toinen kiinteä ja toinen kiertää epäkeskisesti puristaen kaasua keskustaa kohden. Kompressorilla on keskimäärin hyvä isentrooppinen hyötysuhde [26]. Osakuormilla hyötysuhde on melko hyvä, kun käytössä on useita rinnakkaisia ohjattavia scroll-kompressoreita taikka kompressoria säädetään taajuusmuuttajalla. Kompressorityyppi soveltuu lämpöpumppu- ja ilmastointisovelluksiin, jossa sitä käytetään vaihtelevilla osakuormilla, jossa kylmäkerroin on monissa HVAC-sovelluksissa hyvä. Scroll-kompressorin tilavuustuotto on noin 20...30 % parempi kuin mäntäkompressorilla, koska mäntäkompressorin tapaista haitallista tilaa ei ole [32]. Scroll kompressoria käytetään nykyisin yleisesti lämpöpumpuissa.

Turbo- tai keskipakokompressori

Turbo kompressoria käytetään tyypillisesti suurikokoisissa kylmäjärjestelmissä, joissa on suuret kapasiteetit, kuten teollisuuslaitoksissa ja ilmastoinnin vaatimissa veden jäähdytyskoneistoissa. Kompressorityypin energiatehokkuus on oikein mitoitettuna ja isolla käyttöasteella kuormitettuna korkea. Kompressorin energiatehokkuus voi kuitenkin laskea osakuormilla, ellei käytetä kompressorin nopeudensäätöä tai muita soveltuvia säätömekanismia [26]. Kompressori on mekaanisesti melko monimutkainen ja vaatii tarkkaa suunnittelua sekä korkeita pyörimisnopeuksia. Se pystyy tehokkaasti käsittelemään suuria tilavuusvirtoja ja suhteellisen matalia puristussuhteita. Sovelluskohteita ovat kaukojäähdytys, datakeskukset ja isot prosessijäähdytykset, joissa yhden suuren koneikon käytöllä saavutetaan korkea hyötysuhde sekä pitkät yhtäjaksoiset käyntiajat [6].

Kiertomäntäkompressori

Kiertomäntäkompressoria käytetään pieni- ja keskikokoisissa kylmäjärjestelmissä. Kompressorissa on pyörivä mäntä tai roottori sylinterin sisällä, joka jakaa kylmäaineen eri kammioihin ja puristaa sen ulostuloon [26]. Pienissä

teholuokissa se on energiatehokkaampi kuin vanhemmat mäntäkompressorit, mutta hyötysuhde on saman tasoinen tai hieman heikompi kuin scroll-kompressoreilla. Kompressorin yksinkertainen rakenne tekee siitä edullisen valmistaa, ja se soveltuu matalahkoihin puristussuhteisiin. Kiertomäntäkompressoria käytetään usein pienissä ilmastointilaitteissa ja kodinkoneissa. Kylmäainevalinta vaikuttaa myös kompressorin käyttämään tekniikkaan ja sen energiatehokkuuteen. Suuret kiertomäntäkompressorit käyttävät yleensä matalampien puristussuhteiden kylmäaineita.

Kompressorin tehonsäädön vaikutus energiatehokkuuteen

Kompressori on kylmälaitoksen suurin energiankuluttaja, joten sen ohjaukseen ja tehonsäätöön tulee kiinnittää huomiota. Kompressorin tehoa voidaan säätää automaattisesti useilla tavoilla. Kompressorien teho harvoin vastaa todellista muuttuvaa kuormitusta ilman ohjausta.

Käytössä olevia tehonsäätömenetelmiä ovat seuraavat:

- Kompressoria käynnistetään ja pysäytetään tarpeen mukaan jaksottamalla. Kompressori toimii optimiolosuhteissa. Tällöin tiheät käynnistykset kuluttavat tosin energiaa [4].
- Kompressorin pyörimisnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla [14].
- Mäntäkompressorin aktiivisten sylintereiden määrää säädetään kompressorikoneikossa [26].
- Kompressorille tulevaa imuhöyryvirtaa säädetään kuristamalla virtausta säätimen avulla. Tämä pitää hyötysuhteen vakiona muuttuvissa olosuhteissa [4].
- Kuumakaasua ohjataan kompressorin painepuolelta imupuolelle. Tämä lisää energiankulutusta, koska osa kylmäainevirrasta ei osallistu jäähdytykseen mutta kuluttaa silti energiaa. [4].

Taloudellisin ja tehokkain vaihtoehto on säätää pyörimisnopeutta, mikä minimoi painesuhteen. Koneisto toimii korkealla höyrystymislämpötilalla ja matalalla lauhtumislämpötilalla, jolloin kompressorin tuottama kylmäteho vastaa parhaiten todellista kylmäkuormaa. Moottorin On-off toiminnan vaihtaminen pyörimisnopeuden säätöön vähentää sähkönkulutusta 20–30 % [34]. Optimaalinen

tehonsäätö varmistaa, että kompressorin teho vastaa mahdollisimman tarkasti todellista kuormitusta. Se taas vähentää energiahäviöitä ja parantaa kokonaisenergiatehokkuutta.

Lauhdutinpuhaltimen energiatehokkuus

Lauhdutinpuhallin käyttää Danfossin tutkimuksen [14] mukaan noin 12 % kylmäjärjestelmän kokonaisenergiasta. Lauhdutinpuhaltimen energian käyttöön voidaan vaikuttaa säätämällä puhaltimien tehoa. Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeus riippuu kylmäntarpeen muutoksesta ja ulkoilman lämpötilasta.

Lauhduttimen puhaltimen pyörimisnopeutta säädetään nykyään adaptiivisesti, usein tyristoriohjauksella tai EC-moottorilla. Puhaltimien pyörimisnopeuden säätöön on useita eri teknologioita.

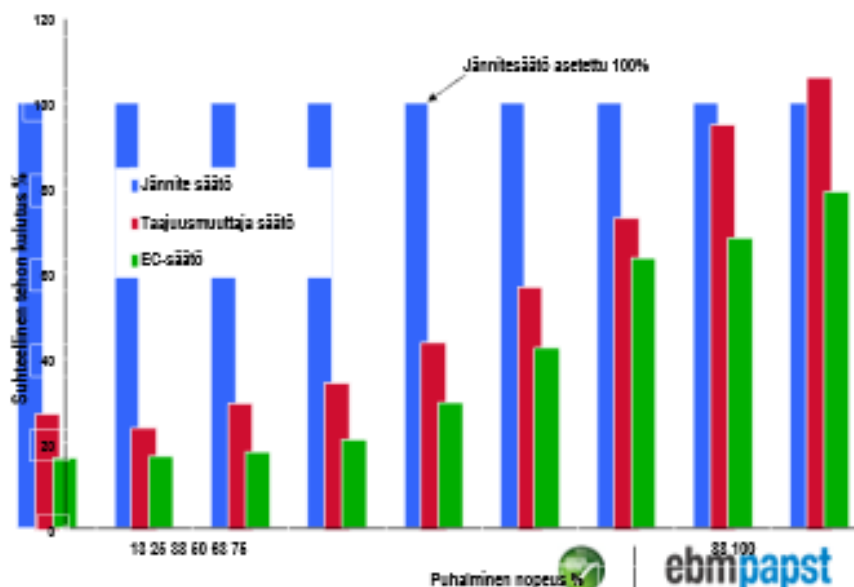
Eri säätimillä on erilaisia etuja ja sovelluksia riippuen puhaltimen tyypistä, käyttökohteesta ja tarvittavasta säätötarkkuudesta.

- Taajuusmuuttaja muuttaa sähköverkon taajuutta ja jännitettä, mikä mahdollistaa moottorin nopeuden säätämisen portaattomasti. Tämä on yksi yleisimmistä käytetyistä säätimistä erityisesti teollisissa ja suuritehoisissa sovelluksissa. Taajuusmuuttajan etuna on laaja nopeusalue ja samalla korkea energiatehokkuus, erityisesti osakuormituksessa. Se mahdollistaa myös pehmeän käynnistyksen ja pysäytyksen, mikä vähentää kulumista [14].
- Portaallinen jännitesäädin säätää moottorin jännitettä portaittain. Se taas vaikuttaa moottorin pyörimisnopeuteen. Tämä säätömenetelmä soveltuu yksinkertaisesti sovelluksiin, kuten pieniin kotitalouspuhaltimiin. Säädin on halpa ja yksinkertainen toteuttaa. Sen haittana on epätarkkuus, rajallinen nopeusalue ja heikompi energiatehokkuus verrattuna portaattomaan säätöön [4].
- Tyristorisäätimellä voidaan säätää moottorin jännitettä kytkemällä ja katkaisemalla virtaa erittäin nopeasti. Tämä muuttaa moottorin keskimääräistä jännitettä ja siten sen nopeutta. Sen edut ovat hyvä säätötarkkuus, kustannustehokas. Se soveltuu erityisesti pienten ja keskikokoisten moottorien ohjaukseen [33].
- Pehmeäkäynnistin säätää moottorin käynnistysvirtaa ja -jännitystä, mikä mahdollistaa pehmeän ja hallitun käynnistyksen ilman äkillisiä virtapiikkejä. Käynnistin vähentää käynnistysvirtaa ja -vääntömomenttia. Se pidentää moottorin elinikää ja vähentää energiankulutusta käynnistyksen aikana [7].

- EC-moottorien käyttö puhaltimessa. Elektronisesti kommutoiduissa moottoreissa (EC-moottorit) on usein sisäänrakennettu nopeudensäätö, joka perustuu mikroprosessoriohjaukseen. Moottorin nopeutta voidaan säätää tarkasti ilman erillistä taajuusmuuttajaa. EC moottorin etuna on korkea energiatehokkuus, laaja säätöalue ja tarkka nopeudensäätö [33].
- Tietyissä puhaltimissa voidaan säätää puhaltimen roottorin lapakulmaa. Se muuttaa ilmavirran määrää ja näin vaikuttaa puhaltimen tehokkuuteen ilman, että moottorin nopeutta tarvitsee muuttaa. Säätö mahdollistaa ilmavirran säädön ilman nopeudensäätöä ja se vähentää energiankulutusta [33].

Taajuusmuuttajat ja EC-moottorit ovat energiatehokkaimpia ja joustavimpia ratkaisuja. Läppäsäädöt ja portaalliset jännitesäätimet sopivat yksinkertaisempiin sovelluksiin. Valinta riippuu säätötarkkuuden ja energiatehokkuuden tarpeesta [33].

EC-moottori on energiatehokkaampi kuin perinteinen AC-moottori. EC-moottori on yleinen ratkaisu puhallinmoottoreissa. Sen etuna on optimaalinen pyörimisnopeuden säätö mahdollisimman pienellä sähkökulutuksella. Haittapuolena on kuitenkin järjestelmän korkea hinta. Puhaltimen nopeuden muuttuessa eri moottorihjausten energiatehokkuutta voidaan tarkastella kuvan 5 mukaisesti.



Kuva 5. Eri puhallinsäätöjen moottorien energiankulutus vertailu [33]

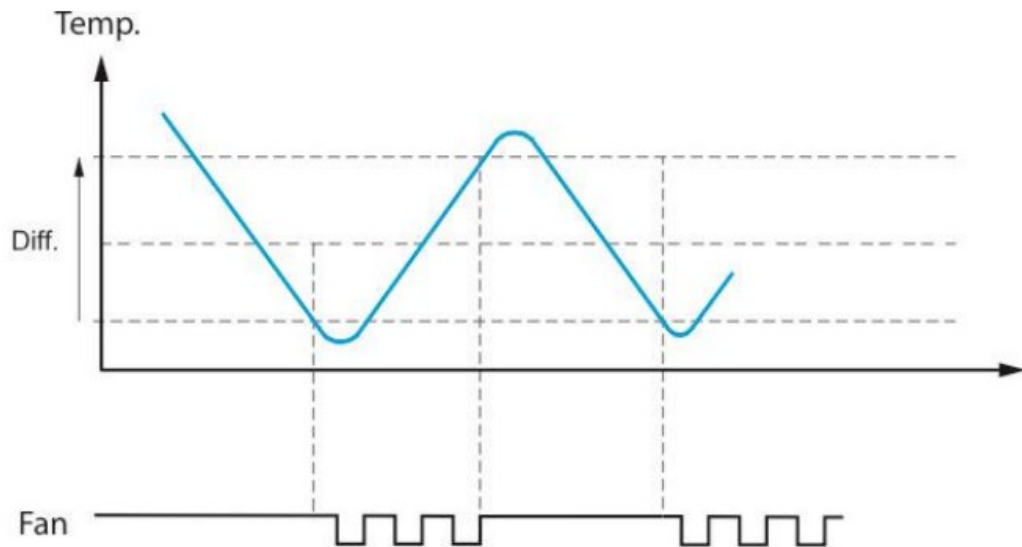
Höyrystinpuhallinten energiatehokkuus

Danfossin tutkimuksen mukaan höyrystinpuhallin kuluttaa noin 19 % kylmäjärjestelmän energiasta [14]. Puhaltimen energiankäyttöön voidaan vaikuttaa säättämällä puhaltimien tehoa tai valitsemalla oikea puhallinmoottori ja säätö.

Höyrystinpuhaltimen energiatehokkuus on tärkeä koko jäähdytys- tai ilmastointijärjestelmän kannalta, koska se tuottaa jäähdytystä haluttuun tilaan. Toteutu-neeseen energiatehokkuuteen vaikuttaa teknologian valinta, sijainti ja ilmanohjaus [4].

Jäähdytettävän tilan lämpötila ja ilmankosteus vaikuttavat höyrystimen sekä puhaltimen toimintaan. Höyrystinpuhallin voi olla energiatehokas optimaalisissa olosuhteissa. Höyrystimen säännöllinen sulatus ja huolto estävät pölyn ja lian kerääntymisen, mikä voi heikentää jäähdytystehoa ja lisätä energiankulutusta [4].

Höyrystinpuhaltimen toimintaa voidaan ajoittaa vastaamaan kylmätehon tarvetta. Kaupan kylmäjärjestelmässä puhaltimen pyöriminen voidaan keskeyttää ajastetusti kaupan ollessa suljettuna. Tämä toteutetaan nykyään sähkönsyötön pulssituksen avulla. Puhaltimia voidaan pulssittaa määrätyn prosenttimäärän tiettyinä ajanjaksona seuraavissa tilanteissa: yöaikaan, kalusteverhojen ollessa kiinni sekä silloin, kun termostaatin katkaisuraja on saavutettu. Puhaltimen käytössä syntyy säästöä, kun jäähdytettävän tilan lämpökuormaa ei ole [14]. Kuvassa 6 on esitetty pulssittavan puhaltimen sähkönsyöttö.

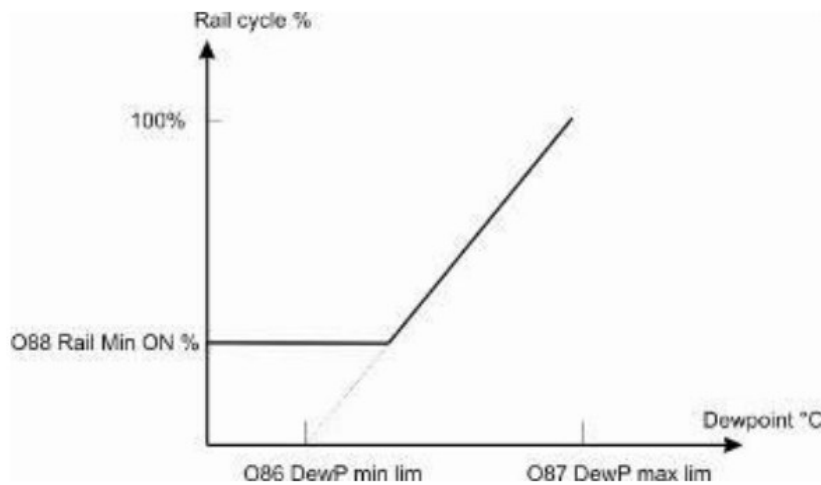


Kuva 6. Pulssittavan puhaltimen sähkönsyöttö [14].

Kylmähuoneen oven lämmitettävän reunalistan vaikutus energiatehokkuuteen

Pakastekalusteen oven reunalistan sähkönkulutus on noin 18 % kokonaiskulutuksesta [14]. Perinteisesti reunalämmitys on ollut jatkuvasti päällä, mutta sähkönsyöttöä voidaan myös jaksottaa yöaikaan. Säätimet mittaavat myymälän kosteutta ja lämpötilaa ympäri vuorokauden, jolloin reunalämmitystä voidaan säätää todellisen tarpeen mukaan.

Reunalämmityksen tehontarve mitoitetaan $+25^{\circ}\text{C}$ lämpötilan ja 85 % suhteellisen kosteuden mukaan. Tyypillinen reunalämmitysteho arvioidaan myymäläkoon perusteella: 500-1000m²: 4-6kW, 1000-3000m²: 12-15kW, 3000-5000m²: 20–25 kW. Reunalistan prosentuaalista sähkötehon syöttöä säädetään ilman kosteusprosentin ja lämpötilan mukaan kuvan 7 mukaisesti [14].



Kuva 7. Reunalistan prosentuaalinen säätö ilmankosteuden mukaan [14].

Sähkösulatuksen vaikutus energiatehokkuuteen

Sähkösulatus kuluttaa noin 4 % koko energiankulutuksesta [14]. Normaalisti sulatus ajoitetaan säätimen avulla. Ajoitus on kompromissi eri olosuhteiden ja todellisen kylmätehotarpeen mukaan [4]. Ajoitusta voidaan lisäoptimoida lisäämällä järjestelmään adaptiivinen säätö höyrystimen digitaalisen tulistussäätimen ohjauksen avulla. Säätimen avulla saadaan syötettyä muuttunut lauhdutinpaine-tieto höyrystinsäätimille reaaliajassa [14].

Säädinratkaisussa höyrystinsäädin vertaa höyrystimen sisään tulevan ja lähtevän ilman lämpötilaerotusta säätimellä laskettuun massavirtaan. Massavirta voidaan laskea mitattujen lauhdutinpaineen, höyrystymispaineen ja paisuntaventtiilin avautumisasteen avulla. Höyrystin on jäässä, kun energiatasapaino näiden välillä on heikentynyt määrätyn asteen verran. Tällöin aloitetaan sulatus [14].

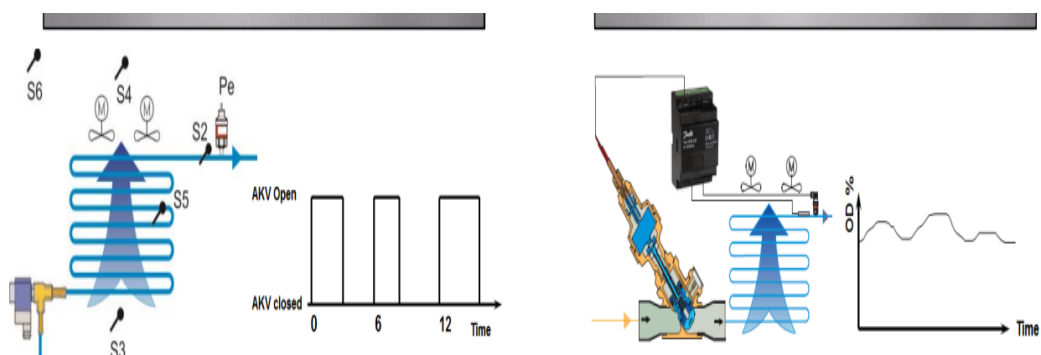
Adaptiiviset sulatukset lisätään normaalisti aikataulutettuihin sulatuksiin. Tällöin sulatuksen aloitusvälille voidaan asettaa minimi aika, jotta aikataulutettu sulatus ei ala heti adaptiivisen sulatuksen jälkeen [14].

Paisuntaventtiilin säätö eli tulistuksen säädön vaikutus energiatehokkuuteen

Elektroninen paisuntaventtiili on energiatehokkaampi kuin termostaattinen paisuntaventtiili. Se voi vähentää höyrystimen tulistuksen 2–3 kelviniin, kun taas termostaattinen paisuntaventtiili pitää sen 6–12 kelvinissä [14]. Tulistuksen suuruus vaikuttaa höyrystimen kylmätehoon ja järjestelmän energiatehokkuuteen.

Elektroninen paisuntaventtiili on normaalisti sähköttömänä kiinni ja toimii samalla magneettiventtiilinä. Venttiilissä on vaihdettava suutin sekä laaja ja lineaarinen toiminta- ja säätöalue. Sillä on parempi öljynpalautus osateholla ja tehokkaampi höyrystimen nestejako verrattuna termostaattiseen paisuntaventtiiliin [14]. Elektroninen paisuntaventtiiliin ollessa täysin auki saavutetaan maksimi nesteen virtaama ja siten korkea paine-ero nestejakajan yli. Tämä aiheuttaa tasaisemman nesteenjaon höyrystimessä ja siten suuremman höyrystimen tehon [14].

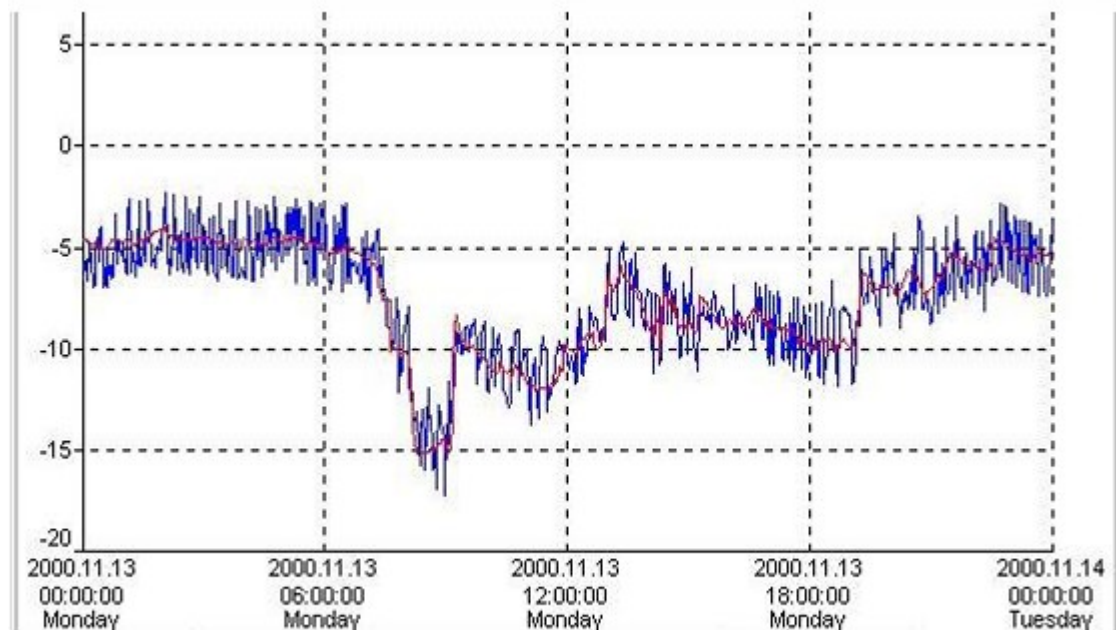
Pulssittava elektroninen paisuntaventtiili pitää virtauksen höyrystimessä turbulენტtina. Turbulenttinen virtaus on tehokkaampi kuin laminaarinen lämmön siirtimenä. Lämmönsiirtokyky on keskimäärin 4 % parempi pussittavalla venttiilillä kuin lineaarisesti säätävällä paisuntaventtiilillä ilmapuhaltimella varustetussa höyrystimissä [14]. Pulssittamalla virtaus on aina turbulენტtista, kun taas lineaarisesti säätävällä venttiilillä virtaus muuttuu laminaariseksi osateholla. Kuva 8 näyttää pulssittavan ja lineaarisen paisuntaventtiilin ohjausta.



Kuva 8. Pulssittava ja lineaarinen paisuntaventtiilin säätö.

Imupaineen säädön vaikutus energiatehokkuuteen

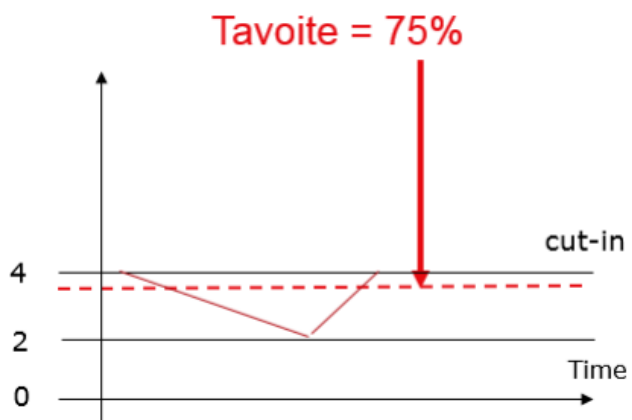
Kompressorin käytössä voidaan tehoa ohjata joko säädettävällä kompressorin tehonsäädöllä tai taajuusmuuttajalla, jolloin kompressorin imupaine mukautuu vastaamaan sen hetkistä kylmätehon tarvetta. Kompressorin paine-ero kasvaa ilman säädintä, mikä heikentää energiatehokkuutta. Imupainesäädin optimoi energiatehokkuutta ja suojaa kompressoria ylikuormitukselta. Kaupan ostoskäyttäytyminen ja järjestelmän kylmätehon tarve vaihtelevat kellonajan mukaan. Imupainesäädin on yleinen isojen kylmäjärjestelmien ohjauksessa [14]. Kuvassa on 9 esitetty tyypillinen kylmäkalusteiden imupainemuutos aukioloaikojen mukaan. Kylmäkalusteessa muutos voi olla 2–4 kelviniä ja pakkasessa noin 1–3 kelviniä [14].



Kuva 9. Mitattu kylmäkalusteiden lämpötila ajansuhteessa [14].

Adaptiivisella imukaasusäädöllä energiankulutusta voidaan vähentää jopa 30 % hetkellisesti. Höyrytimen kuormitus määritetään termostaatin ohjauksen perusteella [14]. Adaptiivinen säätö voidaan mallintaa kuvan 10 mukaan. Kuormitus-tavoitteeksi asetetaan tyypillisesti 75 % normaalista kuormituksesta vähäisen

kuormituksen aikana. Kuormitusta ajoittamalla voidaan säätää imupainetta ja siten vähentää energiankulutusta [14].



Kuva 10. Kylmäkalusteen asetusarvon optimointi käytön mukaan [14].

Liite2: Kylmäjärjestelmän hyödyntäminen kiinteistön energiantuotannossa

Lauhdelämmön talteenotto (LTO) parantaa kiinteistön energiatehokkuutta vähentämällä ostoenergian tarvetta ja hyödyntämällä kompressorien hukkalämpöä lämmitykseen. Erityisesti kaupan kylmäjärjestelmissä LTO-lämmönvaihtimet ovat osoittautuneet tehokkaiksi [34]. Kylmäjärjestelmän optimointi voi merkittävästi vähentää energiankulutusta, ja perinteinen lauhdelämmön talteenottojärjestelmä kattaa noin 33 % rakennuksen lämmitysenergiasta [34].

Lauhdelämmön hyödyntämisen tehokkuus riippuu seuraavista tekijöistä [34]:

- Mikä on rakennuksen koko ja käyttötarkoitus. Suuremmissa kiinteistöissä lauhdelämpöä voidaan hyödyntää tehokkaammin.
- Mitkä ovat lämmitysverkoston toimintalämpötilat. Alhaisemmat lämpötilat parantavat lauhdelämmön hyötysuhdetta.
- Mitkä ovat ulkona vallitsevat lämpötilat. Kylmemmissä olosuhteissa tarvitaan enemmän lisälämpöä, mikä vaikuttaa lauhdelämmön kattavuuteen.

Tutkimusten mukaan hyvin suunnitellulla lauhdelämmön talteenottojärjestelmällä voidaan kattaa merkittävä osa rakennuksen lämmitysenergiasta [34]. Tutkimuksen mukaan seuraavissa kauppatyypeissä voidaan saavuttaa lauhdelämmön hyödyntämisestä energiansäästöhyötyjä [34]:

- Hypermarketit, joissa yli 50 % kokonaislämmitysenergian tarpeesta voidaan kattaa lauhdelämmöllä.
- Suuret supermarketit (yli 3 500 m²) joissa lauhdelämmön osuus voi olla yli 65 %.
- Pienet supermarketit (alle 2 000 m²) joissa lauhdelämpö voi kattaa jopa 75 % lämmitysenergiasta.

Uudistettujen EPBD-säännösten (Energy Performance of Buildings Directive) voimaantullessa 2030-luvulla kaikkien ei-asuinrakennusten on parannettava energiatehokkuuttaan alkuperäisestä 13 % korjausrakentamisen avulla. Tämä koskee esimerkiksi teollisuus-, hotelli- ja toimistorakennusten jäähdytystä [35].

Automaation lisääminen parantaa energiatehokkuutta kylmäjärjestelmissä. Myös eri energiavarastojen, kuten lämpö- ja kylmävarastojen integrointi kiinteistön energialähteisiin on tehokasta. Uusrakennuksissa energiavarastojen hyödyntäminen tulisi olla suunnittelun lähtökohta [34].

Liite 3: Kylmäaineiden ilmastovaikutus ja energiatehokkuuden laskenta

Fluorattujen kasvihuonekaasujen (F-kaasujen) päästöt muodostavat tällä hetkellä 2,5 % koko EU:n hiilidioksidipäästöistä, ja niiden määrä on kaksinkertaistunut vuosien 1990–2014 aikana, vaikka muiden kasvihuonekaasujen päästöt ovat vähentyneet. Tämä kehitys on ongelmallista ilmastomuutoksen torjunnan kannalta, sillä IPCC:n (Intergovernmental Panel on Climate Change) mukaan F-kaasujen päästöjä on vähennettävä 90 % vuoden 2015 tasosta vuoteen 2050 mennessä [1].

Euroopan unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasujen nettopäästöjä vähintään 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä sekä saavuttamaan ilmastoneutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. EU:n asetus 2024/573 määrittelee uudelleen nämä vaatimukset. Asetus velvoittaa uusiin toimiin myös F-kaasujen osalta, koska tarkistettu seuranta aiemmasta asetuksen (EU) N517/2014 vaikutuksesta osoittaa, että asetetut vähennystavoitteet eivät ole toteutumassa suunnitellusti vuoteen 2030 mennessä [1].

Energiatehokkuuden parantaminen on tärkeä keino F-kaasujen päästöjen vähentämisessä. Kylmäjärjestelmien energiatehokkuutta parantamalla voidaan vähentää kylmäaineiden kulutusta ja niistä aiheutuvia päästöjä. Tehokkaammat järjestelmät optimoivat jäähdystehoja pienemmällä energiankulutuksella, mikä paitsi vähentää F-kaasujen käyttöä, myös pienentää sähkönkulutusta ja siitä aiheutuvia epäsuoria päästöjä. Lisäksi energiatehokkuuden parantaminen voi pidentää laitteiden käyttöikä ja vähentää niiden huollon tarvetta [11].

EU:n ilmastotavoitteiden saavuttaminen edellyttää myös laajamittaista koulutusta ja pätevoitymistä, jotta kylmäalan työntekijät osaavat käsitellä F-kaasuja energiatehokkaammin ja hyödyntää ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja. Koulutusohjelmissa tulisi painottaa energiatehokkuuden optimointia, F-kaasuille vaihtoehtoisia kylmäaineita sekä turvallisuusmääräyksiä. Lisäksi pätevointi- ja

koulutusohjelmien tulee pysyä ajan tasalla teknologian ja sääntelyn kehityksen mukana, jotta asentajat pystyvät käyttämään uusia ratkaisuja turvallisesti, tehokkaasti ja kestävästi.

F- kaasujen käyttö asetuksen näkökulmasta

Nykyiset yleisimmät kylmäaineet, eli fluoratut kasvihuonekaasut (F-kaasut), ovat voimakkaita ilmastolämmittäjiä. Yleisimmät F-kaasut ovat HFC:t (HydroFluoroCarbons) ja PFC:t (PerFluoroCarbons), joiden ilmastovaikutus on usein moninkertainen verrattuna hiilidioksiiniin (CO_2). F-kaasuja käytetään kylmäaineina erityisesti kaupallisissa kylmlaitteissa, kuten päivittäistavarakauppojen kylmäjärjestelmissä. Päivittäistavarakaupat ovat yksi suurimmista HFC- yhdisteiden kuluttajista Euroopassa. Kauppa vastaa noin kolmasosaa EU:n HFC-kylmäaineiden kulutuksesta. F-kaasujen suuren ilmastovaikutuksen vuoksi EU on asettanut sääntelyn, jolla niiden käyttöä rajoitetaan asteittain [1].

Nykyisten kylmäjärjestelmien energiatehokkuuden parantaminen on keskeinen tekijä vähentämään F-kaasujen kulutusta. Uudessa asetuksessa on määritetty siirtymäaika, jonka aikana F-kaasujen käyttöä vähennetään asteittain ja siirytään luonnollisiin kylmäaineisiin, kuten hiilidioksiiniin (CO_2), ammoniakkiin (NH_3) ja hiilivetyihin (HC). Energiatehokkuuden optimointi pidentää nykyisten järjestelmien käyttöikää ja vähentää uusien laitteiden hankintatarvetta siirtymäkauden aikana. Lisäksi tehokkaammat kylmäjärjestelmät kuluttavat vähemmän energiaa ja pienentävät näin sekä suoria että epäsuoria päästöjä [1]. Kylmäaine määrien vähetessä on tärkeää keskittyä olemassa olevien kylmäjärjestelmien energiatehokkuuteen, vikaantumisten ehkäisyyn ja vuotojen minimointiin. Tämä edellyttää järjestelmien säännöllistä huoltoa sekä kylmäaineiden kulutuksen seuranta- ja raportointia [1]. Siirtymän aikana jokaisessa EU-maassa otetaan käyttöön keskitetty rekisteri, jonka avulla seurataan F-kaasujen markkinakiertoa.

Kylmäaineiden GWP-arvo (Global Warming Potential) kuvaa niiden ilmastovai-
kutusta suhteessa hiilidioksiiniin sadan vuoden mittaus aikajänteellä. Mitä korkeampi GWP-arvo, sitä suurempi ilmastovaikutus. Siksi matalan GWP-arvon

omaavat luonnolliset kylmäaineet ovat keskeisessä roolissa energiatehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden parantamisessa [1].

Taulukko1 määrittelee vuosittaisen fluorihilivetyjen enimmäismäärän, joka voidaan saattaa EU:n markkinoille [1]. Komissio tarkistaa nämä määrät kolmen vuoden välein varmistaakseen, että F-kaasujen vähennystavoitteet toteutuvat suunnitellusti. Tämä sääntely edistää paitsi päästöjen vähentämistä myös energiatehokkaampien kylmäjärjestelmien kehittämistä ja käyttöönottoa.

Taulukko 1. Markkinoille saatettava F-kaasujen kokonaistonneina GWP määrä [1].

Vuodet	Enimmäismäärä CO₂ ekv tonneina (GWP)
2025–2026	42 874 410
2027–2029	21 665 691
2030–2032	9 132 097
2033–2035	8 445 713
2036–2038	6 782 265
2039–2041	6 136 732
2042–2044	5 491 199
2045–2047	4 845 666
2048–2049	4 200 133
2050	0

2030-luvulla markkinoille ei saa saattaa normaalisti uusia F-kaasulla toimivia kylmäjärjestelmiä, joiden GWP arvo on yli 150 [1]. Nämä järjestelmät pitää

korvata muilla kylmäaineilla toimivilla. Annettu siirtymäaika on lyhyt monille nykyään toimitetuille kylmälaitoksille [1].

HFC kylmäaineet

HFC-kylmäaineet ovat yleisesti käytössä. Niiden korvaaminen vaikuttaa lämpöpumppu- ja kylmäjärjestelmiin. Useimmat nykyiset järjestelmät on vaihdettava vaihtoehtoisiin kylmäaineisiin niiden elinkaaren päättyessä.

F-kaasu kylmäjärjestelmien huolto on sallittua, mutta kylmäaineen lisääminen ilman regeneroitavia aineita on yhä vaikeampaa ja kalliimpaa. Energiatehokkaat järjestelmät vähentävät kylmäainehävikkiä ja vähentävät huollon tarvetta. Tehokas järjestelmä käyttää kylmäaineensa optimaalisesti, mikä vähentää täyttötarvetta ja pienentää pitkän aikavälin kustannuksia.

Järjestelmän uudistaminen on välttämätöntä siirryttäessä luonnollisiin kylmäaineisiin, kuten CO₂ tai R-290 kylmäaineisiin. Uudistukset tulee tehdä huomioiden uusien kylmäaineiden käyttöpainet ja turvallisuusmääräykset. Oikein valituilla kylmäaineilla voidaan parantaa energiatehokkuutta, sillä ne tarjoavat paremman lämmönsiirron ja alhaisemman energiankulutuksen verrattuna perinteisiin HFC-kylmäaineisiin [32].

Tavallisimmin käytettyjä HFC-kylmäaineita ovat HFC-134a, HFC-125, HFC-143a, HFC-32, HFC-404A, HFC-407A, HFC-410A ja HFC-513A. Näillä on korkea GWP-arvo (yli 150), joten niiden käyttö uusissa kylmälaitteissa kielletään vuoteen 2030 mennessä. Tämä sääntely edistää ympäristöystävällisempien ja energiatehokkaampien kylmäaineiden käyttöä, tukien ilmastotavoitteita ja parantaen kylmäjärjestelmien suorituskykyä ja taloudellista kestävyyttä [1].

PFO kylmäaineet

PFO-kylmäaineet (PerFluoroCarbons) korvaavat HFC-kylmäaineet ympäristöystävällisemmillä ja energiatehokkaammilla vaihtoehdoilla. Yleisimpiä PFO-

kylmäaineita ovat HFO-1234yf, HFO-1234ze(E), HFO-1233zd(E) ja HFO-1336mzz(Z). Niiden alhainen GWP-arvo (<2) tekee niistä vähemmän ilmastoa kuormittavia kuin HFC-yhdisteet. [4].

PFO-kylmäaineet (HFO) ovat kehittyneempiä kuin perinteiset HFC-kaasut. Niillä on alhaisempi GWP-arvo ja ne parantavat energiatehokkuutta vähentämällä kompressoritehoa ja toimimalla optimaalisesti alhaisemmissa paineissa. Tämä pienentää jäähdytys- ja ilmastointijärjestelmien energiankulutusta ja kustannuksia [4].

PFO-kylmäaineet ovat ympäristöystävällisiä ja energiatehokkaita, mikä tekee niistä houkuttelevia jäähdytys- ja ilmastointisovelluksissa korvaamaan HFC kylmäaineita olemassa olevassa kylmäjärjestelmässä. Niiden korvaava käyttö pienentää laitteiden käyttöikä ja vähentää huollon tarvetta, tarjoten taloudellisia ja kestävyysasetuja [1].

Hiilidioksidi CO₂ -R744

Hiilidioksidia (CO₂ eli R-744) on käytetty kylmäaineena jo 1800-luvulta lähtien, erityisesti elintarvikekuljetuksissa. 1990-luvulla sen käyttö yleistyi uudelleen ympäristöystävällisyyden ja energiatehokkuuden vuoksi [36]. Nykyään CO₂ nähdään yhtenä vaihtoehtona korvaamaan R-404A-laitteita päivittäistavarakaupan kylmäjärjestelmissä [19.]

Hiilidioksidijärjestelmien suurimmat edut energiatehokkuuden näkökulmasta ovat seuraavat [36]:

- Alhainen Global Warming Potential (GWP) – GWP-arvo on vain 1, mikä tekee siitä ympäristöystävällisemmän vaihtoehdon verrattuna perinteisiin HFC-kylmäaineisiin.
- Korkea lämmönsiirtokyky – Hiilidioksidilla on tehokas lämmönsiirto, mikä mahdollistaa pienemmät lämmönsiirtimet ja vähentää energiahäviöitä.
- Tehokas kylmäaine matalissa lämpötiloissa. Hiilidioksidi on erityisen energiatehokas matalissa lämpötiloissa, mikä tekee siitä ihanteellisen pakaste- ja kylmäsäilytyssovelluksiin.

- Hiilidioksidilla on suuri tilavuustuotto, joten kompressorit voidaan tehdä pienemmiksi. Myös putkikoot ovat pienempiä, mikä vähentää asennuskustannuksia ja lämpöhäviöitä.

Suomessa ja Ruotsissa tehtyjen mittausten mukaan perinteinen kylmälaitos kuluttaa 17–20 % enemmän energiaa vuodessa kuin uudenaikainen hiilidioksidijärjestelmä [19]. Kylmäaineen valinta vaikuttaa eri komponenttien kokoon ja energiatehokkuuteen. Esimerkiksi R744:lla toimiva kompressor on kooltaan pienempi kuin vastaava HFC- järjestelmän kompressor. Tämä johtuu siitä, että kylmäaineen volymetrinen tuotto on parempi kuin esimerkiksi R134A [30]. Supermarketin kokonaisenergiankulutuksesta 30–40 % koostuu kylmälaitteiden sähkönkulutuksesta, joten kylmäaineen valinnalla on suuri vaikutus kokonaisuuden energiatehokkuuteen [34]. Kaupan F-kaasu kylmäjärjestelmän tilalle vaihdettu hiilidioksidijärjestelmä voi tuottaa jopa 5–8 % vuotuisen säästön sähkönenergian kulutuksessa [34].

Hiilidioksidijärjestelmien haasteena on korkeapainesäiliöiden ja -komponenttien tarpeen tarve, mikä nostaa asennuskustannuksia [36]. Lisäksi hiilidioksidi siirtyy helposti ylikriittiseen tilaan, mikä vaatii erityistä suunnittelua optimoidun energiatehokkuuden saavuttamiseksi [36].

CO₂-järjestelmät ovat yleistyneet erityisesti seuraavissa kohteissa [36]:

- Supermarkettien kylmäjärjestelmissä ja kaupallisessa jäähdytyksessä, joissa niiden energiatehokkuus tuo suuria säästöjä.
- Teollisissa kylmävarastoissa ja prosessijäähdytyksessä, joissa vaaditaan suuria kylmätehoja ja alhaisia käyttökustannuksia.
- Hiilidioksidilämpöpumpuissa, jotka ovat yleistyneet erityisesti kuuman veden tuotannossa ja tilojen lämmityksessä, koska CO₂:lla toimivat lämpöpumput ovat erittäin tehokkaita korkeissa lämpötiloissa.

Ammoniakki NH₃- R717

Ammoniakki (NH₃) on tehokas ja ympäristöystävällinen kylmäaine. Ammoniakkia on käytetty teollisuuden jäähdytyksessä yli vuosisadan ajan. Se tarjoaa monia etuja mutta sillä on eräitä haasteita käytössä [37].

Ammoniakilla on hyvä lämmönsiirtokyky ja energiatehokkuus. Ammoniakki siirtää enemmän lämpöä per massayksikkö kuin monet muut kylmäaineet [37]. Termodynamiikan ominaisuuksiltaan ammoniakkin höyrystymislämpö on 6–7 kertainen HFC-kylmäaineeseen verrattuna. Nesteolomuodossa ammoniakilla on pieni viskositeetti ja suuri lämmönjohtavuus. Nämä ominaisuudet parantavat höyrystimen ja lauhduttimen energiatehokkuutta [37].

Ammoniakki on noin 10–20 % energiatehokkaampi kuin R134a, joka on yleisesti käytetty kylmäaine kaupallisissa ja teollisissa jäähdytysjärjestelmissä. Ammoniakki voi olla jopa 20–30 % energiatehokkaampi kuin R404A, joka on toinen yleisesti käytetty kylmäaine erityisesti matalalämpötilajärjestelmissä [30]. Ammoniakkikoneisto on samoissa lämpötiloissa kylmäkertoimeltaan laskennallisesti hiilidioksidikoneistoa energiatehokkaampi. Pienemmillä lämmöntarpeilla ammoniakkijärjestelmä varustettuna hyvällä lämpökertoimella toimivalla lämpöpumpulla on laskennallisesti energiatehokkaampi kuin hiilidioksidijärjestelmä [30].

Ammoniakki ei aiheuta otsonikatoa eikä se ole merkittävä kasvihuonekaasu. Sen ODP (ozone depletion potential) ja GWP (global warming potential) ovat molemmat nolla [37]. Ammoniakkia on saatavilla runsaasti, ja se on suhteellisen edullinen kylmäaine. Ammoniakkijärjestelmät ovat kestäviä ja pitkäikäisiä, mikä tekee niistä taloudellisesti kannattavia pitkällä aikavälillä.

Tietyissä käyttöolosuhteissa R717:llä on potentiaalia käytettäväksi scroll-kompressorissa, jossa korroosiota aiheuttavan kylmäaineen ja kuparikäämien välillä ei ole kosketusta. Tämä voi merkittävästi parantaa kylmäkerrointa samalla alhaisin kustannuksin ja minimaalisen ympäristövaikutuksen kera verrattuna R134a kylmäaineeseen [32].

Ammoniakin haittana on myrkyllisyys. Ammoniakki voi aiheuttaa vakavia terveysriskejä, jos sitä vuotaa ympäristöön. Vuodot voivat aiheuttaa hengitysvaikeuksia, silmä- ja ihovaurioita sekä vakavissa tapauksissa kuoleman.

Ammoniakki on myös syttyvä. Se voi muodostaa räjähtäviä seoksia ilman kanssa tietyissä olosuhteissa [37].

Ammoniakki on korroosioherkkä tietyille metalleille, erityisesti kuparille ja sen seoksille. Tämä asettaa vaatimuksia käytettävien materiaalien valinnalle. Ammoniakilla on voimakas ja epämiellyttävä hajua, joka voi aiheuttaa haittaa, vaikka pitoisuudet olisivatkin turvallisia [37]. Mineraaliöljyt liukenevat ammoniakkiin hyvin vähän. Tällöin pitää rakentaa erillinen öljynkeräysputkisto [4]. Ammoniakki aiheuttaa voimakkaan tulistumisen puristuksessa. Siksi imuputken tulistuminen on pidettävä mahdollisimman alhaisena hyvän imuputken eristyksen avulla [30]. Normaalin kompressorin käämityksen eristelakat eivät kestä ammoniakkaa eikä hermeettinen kompressi ole mahdollinen.

Ammoniakkia käytetään laajasti teollisuuden jäähdytyksessä, erityisesti elintarviketeollisuudessa, panimoissa, jäähdytyskeskuksissa ja kemianteollisuudessa. Sitä käytetään myös ilmastointijärjestelmissä ja jäähdytysvarastoissa [4.]

Palavat luonnolliset kylmäaineet (propaani, isobutaani jne.)

Hiilivedyt, kuten propaani (R290), isobutaani (R600a) ja etaani (R170), ovat yhä suosituimpia kylmäaineita monissa jäähdytys- ja ilmastointisovelluksissa. Niillä on monia etuja, mutta myös tiettyjä haasteita. Hiilivedyt ovat ympäristöystävällisiä. Hiilivedyillä on erittäin alhainen GWP (global warming potential) ja ne eivät aiheuta otsonikatoa (ODP = 0). Tämä tekee niistä ympäristöystävällisiä vaihtoehtoja perinteisille kylmäaineille, kuten HFC- ja HCFC-kylmäaineille [7; 38]. Hiilivedyt ovat tehokkaita lämmönsiirtimiä. Ne mahdollistavat tehokkaan jäähdytyksen ja vähentävät energiankulutusta, mikä johtaa pienempiin käyttökustannuksiin.

Hiilivedyillä on vähäiset yhteensopivuusongelmat eri materiaalien kanssa ja hiilivedyt liukenevat täydellisesti mineraaliöljyihin. Hiilivedyt ovat helposti saatavilla ja suhteellisen edullisia verrattuna joihinkin synteettisiin kylmäaineisiin [38].

Hiilivedyt ovat luonnollisia yhdisteitä, mikä tekee niistä vähemmän haitallisia ympäristölle ja yhteensopivampia luonnon ekosysteemien kanssa.

Hiilivetyjen käytön haitta on niiden syttyvyys. Hiilivedyt ovat helposti syttyviä, mikä asettaa erityisiä vaatimuksia turvallisuudelle ja käsittelylle. Tämä rajoittaa niiden käyttöä tietyissä sovelluksissa ja edellyttää erityisiä turvatoimenpiteitä, kuten liekinestoja ja räjähdysuojausta. Palavien kylmäaineiden käyttö on tiukimmin säädelty (turvallisuusluokka L3) [38]. Sytyvyytensä vuoksi hiilivetyjä käytetään useimmiten pienissä järjestelmissä ja suljetuissa tiloissa, kuten kotitalouksien jääkaapeissa ja pakastimissa, missä kylmäainemäärät ovat pieniä. Hiilivetyjen syttyvyys asettaa haasteita turvallisuuden ja käyttöalueiden suhteen. Huolellinen suunnittelu ja asianmukaiset turvatoimenpiteet ovat välttämättömiä hiilivetyä käytettäessä. Kylmätekniikoiden ja asentajien on oltava erityisen hyvin koulutettuja hiilivetyjen käsittelyssä ja käytössä, jotta turvallisuus voidaan varmistaa [38].

R600a (Isobutaani) käytetään laajasti jääkaapeissa ja pakastimissa. Se on energiatehokas ja soveltuu erityisen hyvin pieniin kylmäjärjestelmiin. R290 (Propani) käytetään erityisesti pienissä ja keskikokoisissa ilmastointilaitteissa sekä lämpöpumpuissa. Se on tehokas ja ympäristöystävällinen vaihtoehto perinteisille HFC-kylmäaineille, kuten R22 ja R410A. [38]. R600a voidaan käyttää kylmäkuljetusjärjestelmissä, kuten rekkojen ja konttien jäähdytyslaitteissa [38].

R290 ja R1270 (Propyleeni) soveltuvat kaupallisiin kylmäjärjestelmiin, kuten supermarketien kylmäkalusteisiin, jäähdytyslaitteisiin ja kylmähuoneisiin. Ne tarjoavat hyvän energiatehokkuuden ja alhaisen ympäristövaikutuksen [32].

R1270:a käytetään teollisissa jäähdytysjärjestelmissä, kuten elintarviketeollisuuden jäähdytyksessä ja prosessijäähdytyksessä, joissa tarvitaan suuria jäähdytystehoja.

Hiilivetyperusteiset kylmäaineet tarjoavat usein yhtä hyvän tai paremman jäähdytystehon verrattuna korvaamiinsa HFC/HCFC-kylmäaineisiin. Keskeisiä suorituskykyetuja ovat korkea jäähdytysteho massayksikköä kohden sekä hyvä

yhteensopivuus yleisesti käytettyjen kompressorien öljyjen kanssa, mikä parantaa järjestelmän luotettavuutta [32]. Korvaamalla HFC-134a hiilivedyillä voidaan parantaa energiatehokkuutta. Tutkimuksessa, jossa verrattiin F-kaasuja hiilivetyihin, saavutettiin 14 % korkeampi kylmäkerroin ja hieman korkeampi energiatehokkuus verrattuna laitteeseen, jossa käytettiin R-134a:ta [32].

Jäähdytysjärjestelmissä hiilivedyt voivat merkittävästi vähentää energiankuluusta. R290 kylmäaineen höyrystymislämpötila on 80 % korkeampi kuin R22 kylmäaineen normaalissa kiehumispisteessä. Korkeampi haihtumislämpö viittaa pienempään kylmäainemäärään [39]. Butaani R600 kylmäainetta käyttävässä kylmäainejärjestelmässä lauhdutinpaine on matalampi kuin R290 (propani) kylmäainetta käyttävässä [39]. Alempi lauhdutinpaine tarkoittaa pienempää putkenpaksuutta. Butaanin käyttö jääkaapeissa on siksi kustannusten kannalta edullista. Butaanin käyttö soveltuu kodin kylmäkoneisiin [32].

Hiilivetyjen luontaiset termodynaamiset ominaisuudet, korkea höyrystymislämpö sekä erinomaiset lämmönsiirtokertoimet parantavat energiatehokkuutta. Monet hiilivetyjä käyttävät kylmäjärjestelmät toimivat alhaisemmillä lauhdutinpaineilla verrattuna F-kaasulla toimiviin järjestelmiin. Hiilivedyt voivat tarjota yhtä hyvän tai paremman jäähdytystehon ja energiatehokkuuden kuin HFC kylmäaineet pienissä ja keskisuurissa kylmäjärjestelmissä.

Kylmäaineiden termodynaamisten ominaisuuksien vaikutus energiatehokkuuteen

Kylmäaineiden termofysikaaliset ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, viskositeetti, ominaislämpökapasiteetti ja tiheys, vaikuttavat merkittävästi jäähdytys- ja ilmastointijärjestelmien energiatehokkuuteen. Saadut tiedot perustuvat tutkimustietoihin [39], [30] ja [32]. Refprop-tietokanta [40] tarjoaa kylmäaineiden termodynaamisia ominaisuuksia ja on alan standardi tietolähde Climacheck R&D manager Klas Berglöfin mukaan. [31].

Lämmönjohtavuus

Kylmäaineen korkeampi lämmönjohtavuus parantaa höyrystimen ja lauhduttimen lämmönsiirtoa. Tämä tehostaa kylmäaineen ja ympäristön välistä lämmönvaihtoa, vähentäen kompressorin työtä ja parantaen energiatehokkuutta [39].

Ominaislämpö C_p

Kylmäaine, jolla on korkea ominaislämpö, pystyy sitomaan enemmän lämpöä massayksikköä kohden. Tämä johtaa tehokkaampaan jäähtyykseen tai lämmitykseen järjestelmässä. Korkean ominaislämmön ansiosta kylmäaine kykenee siirtämään enemmän energiaa, mikä vähentää kompressorin työtä ja parantaa energiatehokkuutta. Korkeampi ominaislämpö aiheuttaa myös matalamman lauhtumispaineen [32].

Isentrooppinen Exponentti

Isentrooppinen eksponentti (tai isentrooppinen indeksi) viittaa kaasujen käyttäytymiseen adiabaattisessa prosessissa, jossa ei tapahdu lämmönvaihtoa. Se kuvaa suhdetta kaasun paineen ja tilavuuden muutosten välillä [30]. Isentrooppinen eksponentti määritetään seuraavan kaavan avulla:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (1)$$

Kaavan 1 parametrit on selitetty seuraavasti:

- C_p on kaasun ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa.
- C_v on kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa.

Isentrooppinen puristus tapahtuu kompressorissa vaikuttaen kylmäjärjestelmän tai lämpöpumpun suorituskykyyn [26].

Höyrystymislämpö

Höyrystymislämpö on se lämpömäärä, joka tarvitaan muuttamaan kylmäaine nestemäisestä kaasumaiseen tilaan vakio lämpötilassa. Kylmäaineet, joilla on korkeampi höyrystymislämpö, voivat absorboida enemmän lämpöä faasimuutoksen aikana. Korkea höyrystymislämpö vähentää kylmäaineen kiertoa ja parantaa energiatehokkuutta [30].

Tiheys

Kylmäaineen tiheys vaikuttaa kylmäaineen massavirtaan kylmäjärjestelmässä. Korkean tiheyden omaava kylmäaine voi siirtää enemmän lämpöä tilavuusyksikköä kohden, mikä voi lisätä järjestelmän energiatehokkuutta. Sopivan korkea tiheys voi olla hyödyllistä, mutta liian korkea tiheys voi aiheuttaa korkeampia painehäviöitä ja lisätä kompressorin työtä [30]. Tiheydellä on vaikutus höyrystintehoon seuraavan laskelman kautta.

Kylmäaineen massavirta m' , höyrystinteho $P_{h\ddot{o}yr}$ ja tiheys ρ lasketaan seuraavasti:

$$m' = \rho \cdot V' = \rho \cdot v \cdot A_{sis} \quad (2)$$

$$P = m' \cdot C_p \cdot dT = m' \cdot dh = \rho \cdot V' \cdot dh \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T} \quad (4)$$

Kaavojen 2, 3 ja 4 parametrit on selitetty seuraavasti:

- P on paine (Pa).
- M on moolimassa (kg/mol).
- R on yleinen kaasuvakio, 8,314 (J/(mol·K)).
- T on lämpötila (K).
- V' on tilavuusvirta.
- v on virtausnopeus.

- A_{sis} on virtauspoikkipinta-ala.
- C_p on kaasun ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa.
- dh on höyrystimessä tapahtuva entalpian muutos.
- ρ on tiheys.

Höyrynpaine

Kylmäaineen höyrynpaine määrittää sen kiehumispisteen eri lämpötiloissa ja vaikuttaa suoraan järjestelmän tehokkuuteen. Optimaalinen höyrynpaine mahdollistaa kylmäaineen höyrystymisen ja lauhtumisen sopivissa lämpötiloissa, mikä takaa tehokkaan lämmönvaihdon ja vähentää energiankulutusta. Jos höyrynpaine on liian korkea tai matala suhteessa järjestelmän toimintaolosuhteisiin, lämmönvaihto tehostuu huonosti, ja kompressorin työmäärä kasvaa, mikä heikentää energiatehokkuutta ja lisää käyttökustannuksia [26].

Yhteenvetona voidaan todeta, että kylmäaineet, joilla on korkea lämmönjohtavuus, optimaalinen viskositeetti, sopiva ominaislämpökapasiteetti ja riittävä höyrystymislämpö, tarjoavat yleensä hyvän energiatehokkuuden. Kylmäaineen valinta näiden termofysikaalisten ominaisuuksien perusteella on tärkeää energiatehokkaiden jäähdytys- ja ilmastointijärjestelmien suunnittelussa. Taulukko 2 näyttää yleisimpien kylmäaineiden termodynaamisista ominaisuuksista esimerkkinä ominaisesti höyrystymislämpötilassa -5 C

Taulukko 2. Muutamien yleisimpien kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuuksia.

Termodynaaminen ominaisuus	R513A	R407C	R744	R717	R600	R32	R290
Lämmönjohtavuus [W/(mK)]	0,0113	0,0116	0,0188	0,0229	0,0137	0,0011	0,015
Viskositeetti (mPa·s)	1,035E-5	1,106E-5	1,408E-5	8,916E-6	6,62E-6	1,12 E-5	7,27E-6
Ominaislämpö Cp (kJ/(kg·K))	0,8988	0,9018	1,662	2,587	1,619	1,2	1,695
Ominaislämpö Cv (kJ/(kg·K))	0,7733	0,7331	0,8405	1,777	1,444	0,78	1,40
Isentrooppinen eksponentti, Cp/Cv	1,16	1,23	1,98	1,46	1,12	1,53	1,21
Höyrystyslämpö (kJ/kg)	372,8	406,4	433	1456	578,2	514,3	569,3
Tiheys (kg/m ³) kaasumaisessa muodossa*	122	163	**	27	22	**	80
Höyrinpaine (MPa)	2,721	3,858	30,46	3,547	0,851	6,9	4,06

- Yllä olevat luvut ovat kylmäaineen tyyppisiä termodynaamisia ominaisuuksia noin -5 C kylmäaineen ollessa kaasumaisessa muodossa.

- Tiheyden laskenta on suoritettu ideaalikaasu kaavan 4 avulla.
- ** CO₂ ja R32 kylmäaineelle ei kyseisessä olosuhteessa voida laskea tiheyttä ideaalikaasun kaavan 4 avulla, lähinnä olomuodon ollessa nestemäisessä olomuodossa vaan tulos pitää laskea esim. Refprop tietokantaa käyttäen [40].

Taulukon tiedot saatiin käyttämällä Coolselector2 [41] työkalua ja tiheyden laskentakaavaa 4 hyväksikäyttäen kun se on mahdollista.

Kaupalliset suunnittelutyökalut kuten Danfoss Coolselector2 [41] ja Pack calculation pro [12] käyttävät omissa sovelluksissaan kylmäaineiden termodynaamisia ominaisuuksia suunnitellessaan työkaluja. Kaupalliset energiatehokkuusmitausohjelmat kuten Climacheck lite [3] käyttävät vastaavasti samoja tietolähteitä omassa laskennassaan. Yhteneväiset parametrit ovat edellytys kylmäaineen energiatehokkuuden arvioimiseksi eri työkaluilla. Tarvitaan tarkastettu tietomalli ja tietovarasto [40], johon kylmäsuunnittelijat ja kylmäaineiden valmistajat voivat nojautua.

Liite4: Climacheck lite-mittausjärjestelmän energiatehokkuuden laskentamalli

Climacheck lite mittausjärjestelmän laskentamalli perustuu menetelmään, jossa järjestelmän tietoja ei asetettu parametrein mittausjärjestelmään vaan mittaus ja mallilaskenta perustuu termodynamiikan perusominaisuuksiin ja termodynamiikan ensimmäiseen lakiin. Järjestelmän energia ei voi hävitä vaan muuttaa muotoaan. Kylmäaineiden termodynaamiset ominaisuudet ovat määritetty lähteen [40] mukaan. Laskentamallin kuvausta on tarkennettu Climacheck R&D manager Klas Berglöf sähköpostikeskustelussa [31].

ClimaCheck määrittää toimivan järjestelmän laskennan tarkkuuden seuraavasti:

- energiatehokkuus (Coefficient of Performance, ± 5 %)
- jäähdytys- ja lämmityskapasiteetti (± 7 %)
- sähköteho (± 2 %)
- kompressorin isentrooppinen hyötysuhde (± 3 %).

Tarkkuudet perustuvat ClimaCheck PA Pro -tiedonkeruujärjestelmään, vakio-ClimaCheck-anturien tarkkuuteen, antureiden asennukseen ClimaCheckin ohjeiden ja hyvien mittauskäytäntöjen mukaisesti sekä tavanomaiseen kylmäprosessiin, jossa on puolihermeettinen tai hermeettinen kompressori.

Antureiden mittausvirheen suuruus on seuraavanlainen:

- paineanturi, ± 1 % FS
- lämpötila-anturi PT1000 Class A
- sähkön tehomittari ClimaCheck EP Pro, Luokka B
- virtamuunnin (20-120 % vaihteluvälillä), ± 2 %.

Mittausjärjestelmä käyttää 10 sensoria, joista 7 on lämpötila-anturia ja 2 paineanturia ja 1 sähkötehonmittari kuten kuva 6 sivulla 18 esittää.

Laskennan keskiössä ovat kompressorin energiatase ja kylmäaineen termodynamiikkaan perustuvat algoritmit. Kompressorin lämpöhäviötä on vähäinen suhteessa kokonaistehoon. Tämä rajoittaa häviön vaihtelun vaikutusta, kuten

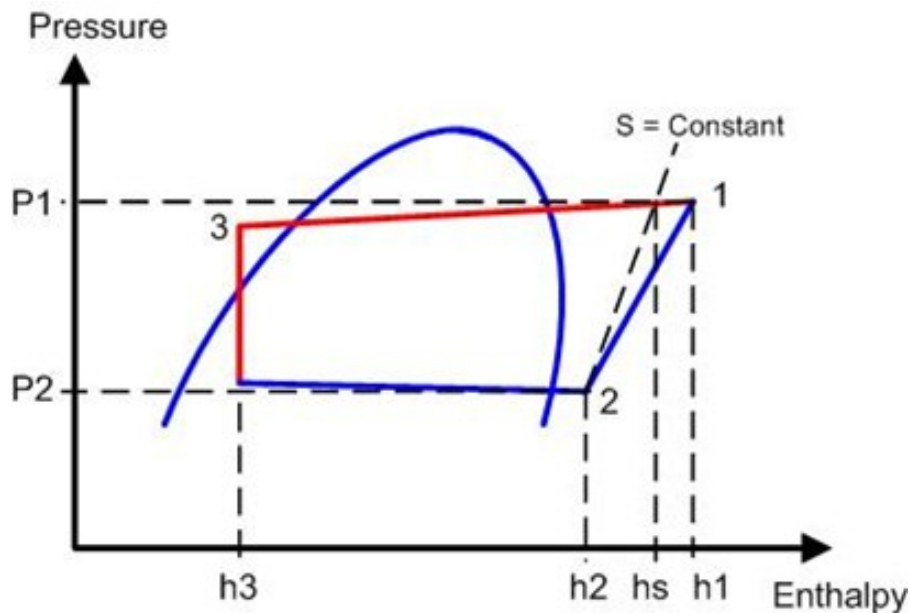
(Asercom, 2003) ja (Naumburg, 1987) ovat osoittaneet lähteen [8] mukaan. Mallin kaava 1 antaa kylmäaineen massavirralle riittävän tarkkuuden.

$$\text{Massavirta} = \frac{(\text{sähköteho} \cdot (1 - \text{komp lämpöhäviö}))}{(h_1 - h_2)} \quad (1)$$

Kaavassa 1 parametrit on kuvattu seuraavasti:

- Sähköteho on kompressorin kuluttama sähköteho (kW).
- Kompressorin lämpöhäviö on vakio.
- h_1 ja h_2 , ovat log p, h-tilapiirroksen (1) pisteiden entalpiat.

Menetelmässä kylmäaineen virtaukseen johdettu nettoenergia määritetään mitatun sähkönkulutuksen perusteella, kun lämmönhäviö on tiedossa. Dokumentoitujen tietojen ja testien perusteella lämpöhäviöt vaihtelivat 3–10 % hermeettisissä ja puolihhermeettisissä kompressoreissa ilman ulkoista jäähdystystä. Tämä kattaa valtaosan markkinoilla olevista kompressoreista. Avoimien kompressorien ja erillisellä jäähdytyksellä varustettujen kompressorien kohdalla voidaan käyttää samaa menetelmää lisäämällä erillinen malli siitä energiamäärästä, joka ei siirry kylmäainevirtaan. Järjestelmän energiatasapainoa voidaan kuvata kuvan 1 mukaisesti. Kuvan mukaiset pisteiden entalpiat saadaan mitattujen lämpö- ja painetietojen avulla kylmäaineen termodynaamisen tietojen avulla tietokannasta [40].



Kuva 1. Järjestelmän log p, h -tilapiirros [4.]

Järjestelmän energiatehokkuus kaavat ovat vastaavasti.

$$\text{Kylmäteho} = \text{Massavirta} * (h_2 - h_3) \quad (2)$$

$$\text{Isentrooppinen kylmäkerroin} = (h_s - h_2) * \frac{(1 - \text{lämpöhäviö})}{(h_1 - h_2)} \quad (3)$$

Kaavoissa 2 ja 3 h_1 , h_2 , h_3 ja h_4 ovat log p, h-tilapiirroksen kuva 1 pisteiden entalpia-arvot.

Mittausjärjestelmän tulosten mittaristo on kuvattu tutkimuksessa seuraavasti.

SEI indeksi on järjestelmän pää tehokkuusmittari, kylmäainekierron hyötysuhde (η_1), höyrystimen hyötysuhde (η_2), lauhduttimen hyötysuhde (η_3) ja kompressorin isentrooppinen hyötysuhde (η_4) ovat päämittarin alakohtaisia tehokkuusmittareita.

SEI indeksi

Järjestelmän kokonaistehokkuus indeksi (System performance index (SEI) - arvo kertoo, kuinka hyvä suorituskyky on suhteessa siihen, mitä teoreettisesti

olisi mahdollista saavuttaa mitatuissa olosuhteissa. Arvon avulla voidaan verrata eri koneiden tai järjestelmien suoriutumista keskenään tai arvioida, onko mittaushetken suorituskyky heikompi kuin suunniteltu. Tämän avulla voidaan tunnistaa tehostamistarpeet esimerkiksi säätöjen tai huollon osalta. Teoreettinen maksimiarvo vastaa Carnot menetelmän vastaavaa tehokkuutta mitatuissa olosuhteissa.

Kylmäkierron hyötysuhde (η_1)

Refrigerant cycle efficiency (hyötysuhde η_1) kuvaa, kuinka lähelle termodynaamisesti ideaalia höyrykompressoriprosessia kylmäainetta hyödyntävä jäähdytys- tai lämpöpumppujärjestelmä pääsee valituissa paine- ja lämpötilaoloissa. Se on yksi SEI-menetelmässä (System Efficiency Index) käytettävistä "osahyötysuhteista", joiden avulla voidaan tarkastella tarkemmin, missä kohtaa kiertoprosessia syntyy eniten tehon- tai energiahäviöitä.

Näin saadaan yksityiskohtaista tietoa siitä, miten järjestelmän kokonaissuorituskykyä (SEI) voisi parantaa:

- Kylmäkierron tehokkuuden avulla voidaan tarkastella, onko jokin kylmäaineen ominaisuus (esim. iso liukuma seoksissa) merkittävästi pienentämässä kierron ihanteellista hyötysuhdetta.
- Mikäli kylmäkierron tehokkuus on alhainen, kierron rakenteessa (esim. talteenotto, paisuntaratkaisut, ylikuumenemissäädöt) voi olla kehittämistarpeita.
- Ylimääräinen ylikuumeneminen tai vajaa alijäähdytys heikentävät kierron ideaalia kerrointa, mikä näkyy pienempänä η_1 -arvona.
- Kylmäainekierron hyötysuhde on vain yksi osa SEI-lukua. Kun samaan aikaan tarkastellaan kompressorin hyötysuhdetta (η_2), painehäviöitä putkistossa (η_3), lämmönsiirtimen tehokkuutta (η_4) jne., voidaan paikantaa järjestelmän heikoimmat lenkit.

Kompressorin hyötysuhde (η_2)

Compressor efficiency (kompressorin hyötysuhde, merkitty η_2) on yksi SEI-menetelmässä käytettävistä osahyötysuhteista. Se kuvaa, kuinka tehokkaasti

kompressorin muuntaa sähkötehon kylmäaineen paineen nostamiseen. Eli kuinka suuri osa syötetystä sähköenergiasta päätyy hyödylliseksi työkseen jäähdytys- tai lämpöpumppuprosessissa. Tämä voidaan käytännössä määrittää sisäisen mittausmenetelmän avulla, jossa mitataan kylmäaineen paineet ja lämpötilat ennen ja jälkeen kompressorin, ja näiden perusteella lasketaan isentrooppinen entalpianousu kylmäaineelle kaavan 3 mukaan. Lisäksi mitataan kompressorin sähköteho. Näin saadaan η_2 -luku, joka kertoo, kuinka suuri osa sähkötehosta aiheuttaa todellista painetta nostavaa työtä kylmäaineessa.

Kompressorin hyötysuhde on tärkeä mittari kolmesta syystä:

- Energiankäytön tehokkuus: Suuri osa jäähdytysjärjestelmän energiankulutuksesta tapahtuu kompressorissa. Huono η_2 tarkoittaa suoraan suurempaa sähkönkulutusta.
- Kunnonvalvonta ja vianetsintä: Matala η_2 voi viitata kompressorin mekaanisiin ongelmiin, sähkömoottorin heikkoon kuntoon, tai huonoon kylmäainevirtausprosessiin (esimerkiksi neste iskeytyy kompressorin).
- Optimointitarpeen osoitus: Hyvä η_2 voi sulkea pois kompressorin ongelmat, jolloin voidaan keskittyä muihin järjestelmän osiin (lämmönsiirto, paisuntaprosessi ja niin edelleen).

Raportissa korostetaan, että kompressorin hyötysuhteen analysointi on erityisen tärkeää lämpöpumppukäytössä, koska osa kompressorin häviöistä siirtyy hyötylämpönä lämmityspiiriin — toisin kuin jäähdytyskäytössä, missä kaikki häviöt ovat haitallisia. Tästä syystä η_2 -tulokinta riippuu myös käyttötarkoituksesta (lämmitys vai jäähdytys).

Höyrystin (η_{4a}) ja Lauhdutin(η_{4b}) hyötysuhde

SEI-raportin mukaan lämmönsiirtimen hyötysuhde η_4 (joka voidaan jakaa erikseen höyrystimelle ja lauhduttimelle) lasketaan vertaamalla todellista lämpötilaeroa lämmönsiirtimen yli teoreettiseen minimiin, joka tarvittaisiin ideaaliseen lämmönsiirtoon.

Tutkimuksen mukaan η_4 kertoo suoraan lämmönsiirtimien laadusta, mitoituksista ja mahdollisista ongelmista (kuten likaantumisesta, huonosta virtaamasta tai ilman/veden lämpötilan epäsopivuudesta). Korkea η_4 ($> 0,8$) merkitsee hyvää lämmönsiirtoa, jossa pienet lämpötilaerot riittävät energiansiirtoon. Matala η_4 ($< 0,6$) merkitsee huonoa lämmönsiirtoa, jolloin tarvitaan suuria lämpötilaeroja siirtämään lämpöä. Tämä taas tarkoittaa korkeampaa energiahäviötä ja huonompaa kerrointa. Jos koko järjestelmän SEI-indeksin arvo on matala, mutta η_4 on korkea, ongelma ei ole lämmönsiirtimissä. Jos taas η_4 on matala, niin voidaan kohdentaa huolto, säätö tai mitoitusanalyysi juuri lämmönsiirtimiin (esimerkiksi lämmönvaihtimen vaihto, virtausmäärän optimointi tai putkien puhdistus).

Laskentamallin tarkempi kuvaus on esitetty lähdeviitteessä [8].