



Jere Aalto

Kaupan kylmäjärjestelmään sarjaan kytketty lauhdelämpöpumppu ja sen tuottama ostoenergian säästö CO₂- kylmäkompressoreissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

4.4.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Jere Aalto
Otsikko:	Kaupan kylmäjärjestelmään sarjaan kytketty lauhdelämpöpumppu ja sen tuottama ostoenergian säästö CO ₂ - kylmäkompressoreissa
Sivumäärä:	33 + 2 liitettä
Aika:	4.4.2023
Tutkinto:	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	LVI-insinööri Antti Kuikka yliopettaja Aki Valkeapää DI Esko Kaappola vanhempi kylmäasiantuntija Mikko Keitaanranta

Tämän insinöörityön tavoitteena oli selvittää kaupan hiilidioksidikylmälaitokseen liitetyn alijäähdyttimen säästämä ostoenergian määrä vuositasolla. Työssä on käyty läpi kylmätekniinen kiertoprosessi, sen pääkomponentit ja niiden toiminta. Lisäksi työssä on käyty läpi kylmäaineiden historiaa sekä niiden ominaisuuksia, lauhdelämpöpumpun toiminta, kaupan kylmälaitoksen toiminta booster-koneikolla ja kaupan kylmäjärjestelmään sarjaan kytketty lauhdelämpöpumppu ja sen toiminta.

Insinöörityö on tehty yhteistyössä Suomen Osuuskauppojen Keskuskunnan kanssa ja työssä käytetyt lähtötiedot laskelmiin on saatu Suomen Osuuskauppojen Keskuskunnan asiakkaalta. Tutkimuksessa on käytetty erään päivittäistavarakauppaan asennetun kylmäjärjestelmän koneajoa. Insinöörityössä tutkittu kohde sijaitsee Helsingissä.

Työn tavoitteena oli selvittää laskemalla alijäähdyttimen säästämän ostoenergian määrä vuositasolla. Insinöörityössä selvisi, että kohteen ostoenergian määrän tarve väheni noin 10 %, kun alijäähdytin kytketään mukaan.

Avainsanat: Hiilidioksidi, Lauhdelämpöpumppu, Kylmäkoneikko

Abstract

Author: Jere Aalto
Title: Condensing Heat Pump Connected in Series to Commercial Refrigeration System and its CO₂ Energy Savings in Refrigeration Compressors
Number of Pages: 33 + 2 appendices
Date: 4 April 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Engineering
Supervisors: Antti Kuikka, HVAC Engineer
Aki Valkeapää, Principal Lecturer
Esko Kaappola, Master of Science
Mikko Keitaanranta, Senior Refrigeration Specialist

The aim of this final year project was to determine the amount of purchased energy saved per year by a sub cooler connected to a commercial carbon dioxide refrigeration plant. Another aim was to calculate the amount of purchased energy saved by the sub-chiller on an annual basis. The thesis discussed the refrigeration cycle process, its main components and their operation as well as the history of refrigerants and their properties, the operation of a condensing heat pump, the operation of a commercial refrigeration plant with a booster machine and the operation of a condensing heat pump connected in series to a commercial refrigeration system.

The input data for the calculations used in the study were obtained from a customer of the commissioning company. The study used the machine run of a refrigeration system installed in a grocery store in Helsinki.

The study showed that the amount of energy needed for the purchase of the studied grocery store was reduced by about 10% when the sub cooler was switched on.

Keywords: carbon dioxide, condensate heat pump, refrigeration machine

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kylmätekniinen kiertoprosessi	3
2.1	Höyrystin	4
2.2	Kompressori	4
2.3	Lauhdutin	4
2.4	Alijäähdytin	4
2.5	Paisuntaventtiili	7
2.6	Kaupan kylmäkoneistot	7
3	Kylmäaineet	8
3.1	CFC-kylmäaineet	9
3.2	HCFC-kylmäaineet	9
3.3	HFC-kylmäaineet	10
3.4	CO ₂ eli hiilidioksidi	12
4	Kaupan CO ₂ -kylmälaitos	13
4.1	Boosterkoneikko	15
4.2	Leimahduskaasu (flashgas)	19
5	Lauhdelämpöpumppu	20
5.1	Lauhdelämpö	20
5.2	Lauhdelämpöpumpun kytkentä boosterkoneikkoon	22
6	Laskelmat	26
7	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Liitteet

Liite 1: Kylmätekniiset laitteet ja niiden symbolit.

Liite 2: Laskelmien tulokset.

Lyhenteet

CFC	<i>Kylmäaineen yhdiste. Chloro-Fluoro-Carbon</i>
COP	<i>Lämpöpumpun hyötysuhde. Coefficient of Performance</i>
COP _C	<i>Kylmäkoneikon hyötysuhde. Coefficient of Performance Carnot</i>
CO ₂	<i>Kemiallinen yhdiste. Carbon dioxide.</i>
GWP	<i>Ilmastoa lämmittävä vaikutus. Global Warming Potential</i>
HCFC	<i>Kylmäaineen yhdiste. Hydro-Chloro-Fluoro-Carbon</i>
HFC	<i>Kylmäaineen yhdiste. Hydro-Fluoro-Carbon</i>
LT	<i>Kompressorin matalapainepuoli. Low pressure.</i>
MT	<i>Kompressorin korkeapainepuoli. Medium pressure.</i>

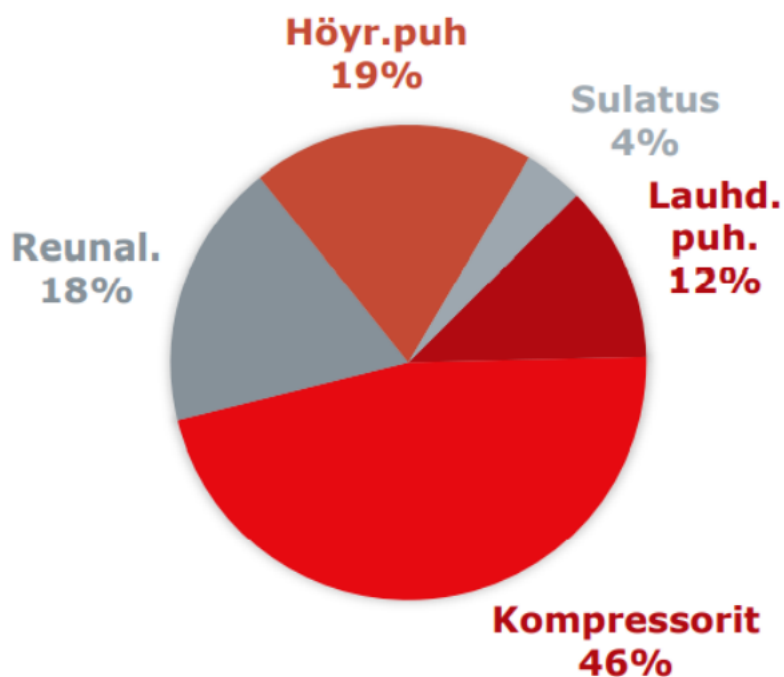
1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty yhteistyössä Suomen Osuuskauppojen Keskuskunnan ja insinööritoimisto Antti Kuikka Oy:n kanssa. Työssä käytetyt esimerkit sekä laskelmat perustuvat olemassa oleviin kohteisiin. Insinööritoimisto Antti Kuikka on pitkäaikainen S-ryhmän kiinteistöjen suunnittelija.

Tämän insinööri työn tavoitteena on saada selville, kuinka paljon säästetään osatoenergian määrää kylmäkompressoreissa, kun lauhdelämpöpumppu on kytketty sarjaan kaupan kylmäjärjestelmän kanssa. Työssä tarkastellaan kylmäkompressoreiden sähkönkulutusta, kun kylmäprosessia ajetaan pelkästään kaasujäähdyttimen kautta tai kun kylmäaine ajetaan alijäähdyttimen kautta.

Kuvassa 1 on esitetty HFC-kylmäaineilla toimivan kaupan kylmälaitoksen sähköenergian kulutus. Kompressorien kuluttaman sähkön osuus on 46 % koko kylmälaitoksen sähkön kulutuksesta. S-marketin kokoisessa kiinteistössä 46 %:n energiankulutus vastaa vuositasolla noin 137 MWh: a.

Kylmäjärjestelmän energiankulutus

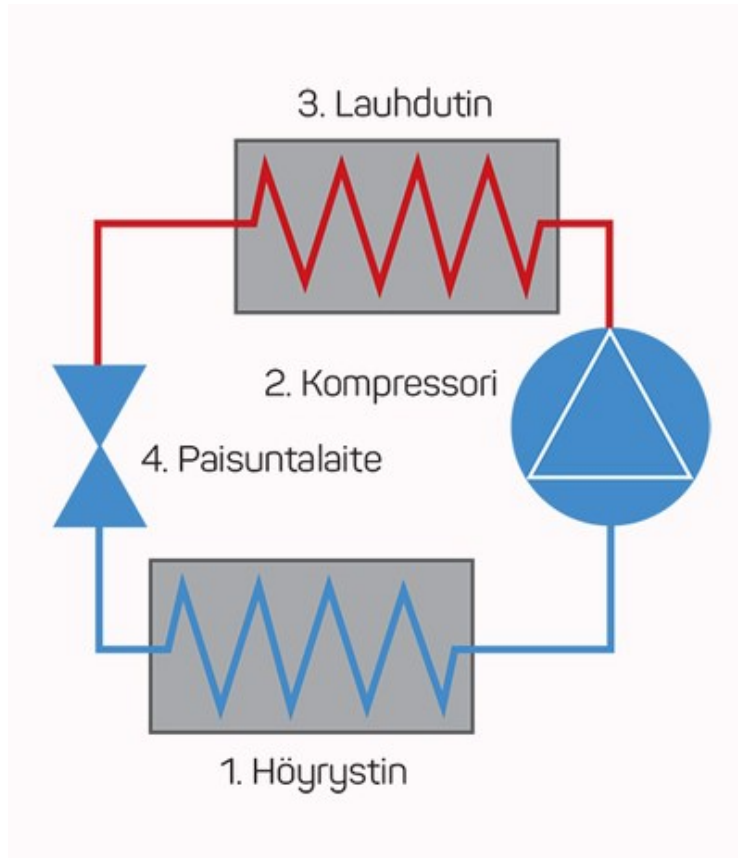


Kuva 1. Vanhojen kylmäjärjestelmien energiankulutus [1].

Nykyisten kaupan kylmäjärjestelmien osuus koko kiinteistön energiankulutuksesta on noin 30 %. Huonosti valvotussa ja viritetyssä uudessakin kohteessa kompressorien sähkön kulutuksen osuus voi olla jopa 60 %. Suurin energiankuluttaja kylmäprosessissa on kompressorit, ja tämä energiankulutus halutaan pitää mahdollisimman pienenä. Korkeapainekompressorin energiankulutusta voidaan vähentää erillisellä alijäähdyttimellä, rinnakkaisen puristuksen kompressorilla tai ejektorin avulla, joilla pienennetään flashgas-kaasun määrää ja näin kompressorin työtä. Yleensä ejektorit kytketään rinnakkaispuristukseen.

2 Kylmätekniinen kiertoprosessi

Kylmäprosessin toiminta perustuu kylmäaineen olomuodon muutokseen ja niissä sitoutuvaan tai vapautuvaan energiaan. Kylmäaine on prosessin eri tilapisteissä kaasumaista, nestemäistä tai niiden seos. [2] Kuvassa 2 on esitetty kylmäprosessin pääkomponentit.



Kuva 2. Kylmäprosessin pääkomponentit [2].

Kylmäaine höyrystyy höyrystimessä, se puristetaan kompressorissa korkeaan paineeseen ja lauhduttimessa kylmäaine lauhuu nesteeksi. Nestemäinen kylmäaine virtaa paisuntaventtiilille, josta se syötetään höyrystimeen.

Kylmäainekierrossa puhutaan matalapaine- ja korkeapainepuolesta. Kuvassa 2 matalapainepuoli on paisuntalaitteen ja kompressorin alapuolella ja korkeapainepuoli on paisuntalaitteen ja kompressorin yläpuolella. [2]

2.1 Höyrystin

Höyrystimessä paisuntaventtiililtä syötetty kylmäaine höyrystyy. Höyrystin voi olla lamellilämmönsiirrin, lamellilämmönsiirrin puhaltimella, moniputkilämmönsiirrin u-putkella tai levylämmönsiirrin. Puhallinhöyrystimiä käytetään yleensä kylmä- ja pakkashuoneissa.

Höyrystimen jäähdystehon mitoitukseen vaikuttaa lämmönsiirto-osan lämmönläpäisykerroin, lämmönsiirto-osan ulkopinta-ala ja logaritminen lämpötilaero. Tärkeää mitoittamisessa on huomioida lamellijako: mitä suurempi kosteus, niin sitä suurempi lamellijako. Yleisesti käytetään lamellijakoa 7–18 mm [3, s. 58.]

2.2 Kompressor

Kompressorissa tehty työ kohdistuu höyrystimeltä tulevaan höyryyn, jota puristetaan suurempaan paineeseen. Mitä suurempaan paineeseen höyry puristetaan, sitä suurempi lämpötila saavutetaan. Puristustyön kasvaessa kompressorin sähkön kulutus kuitenkin lisääntyy. Kompressoreita on hermeettisenä, puolihhermeettisenä ja avokompressorina. [3, s. 50.]

2.3 Lauhdutin

Lauhduttimen tarkoitus kylmäkierrossa on jäähdyttää ja lauhduttaa kuumakaasunestemuotoon. Lauhdutintyyppinä on ilmalauhdutin, moniputkilauhdutin ja levylämmönsiirrin. Kun lämpöä halutaan ottaa talteen, käytetään yleensä lauhduttimena levylämmönsiirrintä. Talteen otettu lämpö hyödynnetään kiinteistön lämmitysjärjestelmässä. Lauhduttimella voidaan lauhduttaa kylmäainetta ilmalla tai nesteellä. [3, s. 54.]

2.4 Alijäähdytin

Alijäähdytin on myös lämmönsiirrin. Alijäähdytin on kylmäkierrossa lauhduttimen tai kaasujäähdyttimen ja paisuntaventtiilin välissä. Alijäähdyttimen tehtävänä on

jäähdyttää kylmäkierrossa olevaa kylmäainetta sekä poistaa hiilidioksidilla toimivan kylmälaitoksen ylikriittisen tilanteen flashgas. Alijäähdyttimessä kiertävää kylmäaineliuosta voidaan jäähdyttää lauhdelämpöpumpulla, jolloin alijäähdyttimellä kylmäaineliuokseen siirtynyt lämpö siirretään lauhdelämpöpumpun höyrystimelle ja edelleen lämpöpumpulla lämmitysverkostoon. Kuvassa 3 on esimerkki market-kokoluokan hiilidioksidikoneiston konepukkiin liitetystä alijäähdyttimestä. Kuvassa punaisilla virtaussuuntatarroilla merkityissä putkissa virtaa korkeassa paineessa oleva hiilidioksidi.



Kuva 3. Konepukin pääty. Ylhäällä alijäähdytin ja alhaalla tulistuksen poistin.

2.5 Paisuntaventtiili

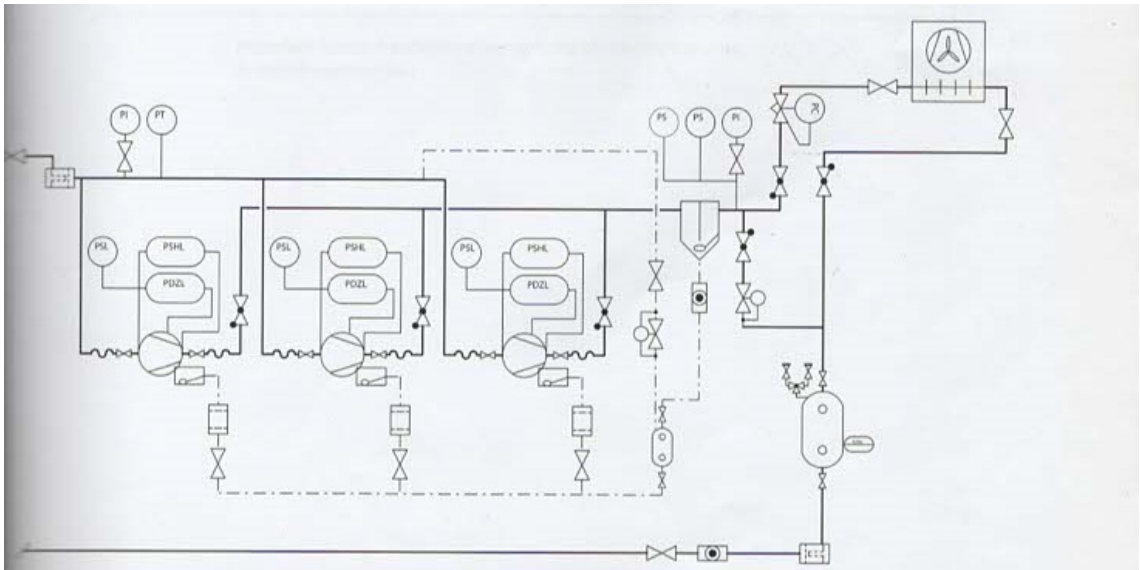
Kylmäkierrossa paisuntaventtiilin tehtävänä on säätää kylmäaineen virtausta höyrystimelle sekä ylläpitää paine-ero korkea- ja matalapainepuolen välillä. Optimaalisen kylmätehon saavuttaminen vaatii sopivan kylmäaineen syötön. Kylmäainetta ei tule syöttää liikaa, koska kaikki höyrystimeen syötetty kylmäaine pitää saada höyrystymään.

Nykyisin yleisimpiä paisuntaventtiilityyppejä ovat elektroninen ja sähköinen paisuntaventtiili. Venttiilit voivat olla pulssisäätöisiä tai jatkusäätöisiä. Pulssisäätteisellä venttiilillä syötetään kylmäainetta höyrystimeen pulssin pituutta muuttamalla. Venttiili on käytännössä magneettiventtiili, joka on kiinni tai auki tietyn aikaa. Jatkuvasäätöinen venttiili toimii portaattomasti askelmoottorin avulla syötäten kylmäainetta jatkuvasti höyrystimeen. [4, s. 214.]

Vanhoja paisuntaventtiileitä on mekaaninen termostaattinen paisuntaventtiili sekä kapilaariputkella toimivat venttiilit. Mekaaninen paisuntaventtiili toimii höyrystimen jälkeisen tulistuksen mukaisesti, säätämällä kylmäaineen syöttöä höyrystimelle tulistuksen mukaan. Kapilaariputki on säätötapa, joka perustuu putken pituuden ja sisähalkaisijan aiheuttamaan painehäviöön. [5, s. 107, 108.]

2.6 Kaupan kylmäkoneistot

Kaupan kylmäkoneistot on usein toteutettu rinnan konepukkiin kytketyillä kompressoreilla. Kuvassa 4 on esimerkki tyypillisestä marketin kylmäkoneistosta.



Kuva 4. Kaupan rinnankytketty ilmalauhdutteinen kompressorikoneikko [6].

Kaupan höyrystimiltä virtaava kylmäaine siirtyy kompressoreiden imuaukkoon, kompressorit ovat varustettu kaksoispainekytkimillä, öljynpaineenvartijoilla sekä matalapainekytkimillä. Kompressoreita ohjataan taajuus- tai on/off-perusteisesti, mikä mahdollistaa sen, ettei kompressoreita käytetä yhtä aikaa täydellä teholla. Kompressorit puristavat kylmäaineen korkeaan paineeseen. Ensin kylmäaine virtaa takaiskuventtiileiden sekä öljynerottimen läpi, jossa poistetaan suurin osa kylmäaineen seassa olevasta öljystä. Öljynerottimen jälkeen kaasumainen kylmäaine virtaa lauhduttimeen, jossa se lauhdutetaan nesteeksi. Nestemäinen kylmäaine virtaa lauhduttimelta nestevaraajaan. Nestevaraajalta kylmäaine virtaa kaupan höyrystimien paisuntaventtiileille. Kuvan koneisto on varustettu myös lauhdutinpaineen ja varaajapaineen säätöventtiileillä. Ne nopeuttavat paineen nousua kompressorien käynnistyessä, ja koneisto saavuttaa häiriöttömät käyntiolosuhteet nopeasti erityisesti talvitilanteessa. [7]

3 Kylmäaineet

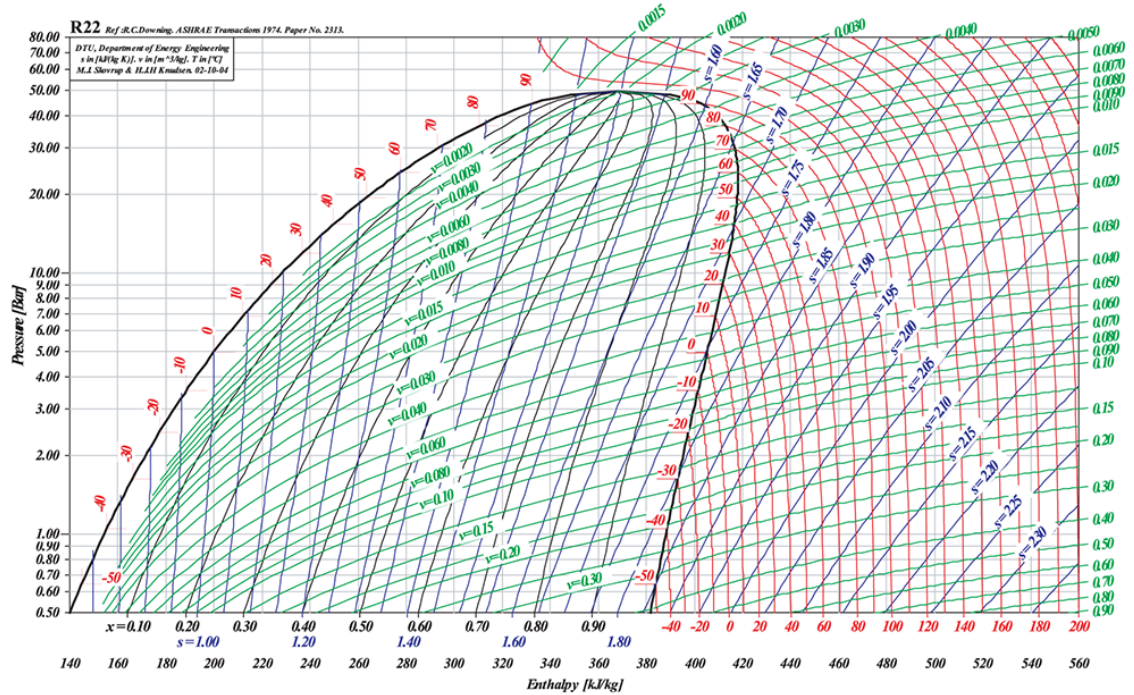
Kylmäaineen tehtävänä on siirtää, sitoa sekä luovuttaa lämpöä kylmäkoneistossa. Kylmäaineen fysikaalisia suureita ovat esimerkiksi ominaislämpö, lämmönjohtavuus, tiheys ja viskositeetti.

3.1 CFC-kylmäaineet

CFC-kylmäaineiden historia ulottuu 1930-luvun alkuun. Kemisti Thomas Midleyn tutkimukset tuottivat tulosta, kun hänen yrityksensä tutki alkuaineiden (hiili, typpi, happi, rikki, vety, fluori, kloori ja bromi) ominaisuuksia. Lopulta päädyttiin halogenoitujen hiilivetyjen omaavaan kylmäaineen käyttöön kylmäteknikassa. Esimerkiksi R-11 ja R-12- kylmäaineet ovat CFC-pohjaisia kylmäaineita. CFC:n hyviä puolia on palamattomuus, myrkyttömyys ja stabiilisuus. CFC-kylmäaineella on suuri GWP- ja ODP-arvo. 1970-luvulla havaittiin CFC-kylmäaineen tuhoavan otsonikerrosta. CFC käyttöä kuitenkin jatkettiin vielä 1995-luvulle asti. Käyttöä rajoitettiin kuitenkin jo vuonna 1987 Montrealin sopimuksen myötä. [8]

3.2 HCFC-kylmäaineet

HCFC-kylmäaineiden tuotanto alkoi vuonna 1930, ja ne kuuluvat CFC-kylmäaineiden rinnalla toisen sukupolven kylmäaineiden piiriin. HCFC-kylmäaineista on tehty sopimus, että niiden käytöstä luovutaan vuoteen 2029 mennessä. Esimerkiksi R-22 on HCFC-pohjainen kylmäaine, jonka tuotanto on lopetettu vuonna 2020 tammikuussa, koska R-22 on otsonikerrosta tuhoava aine. [8]

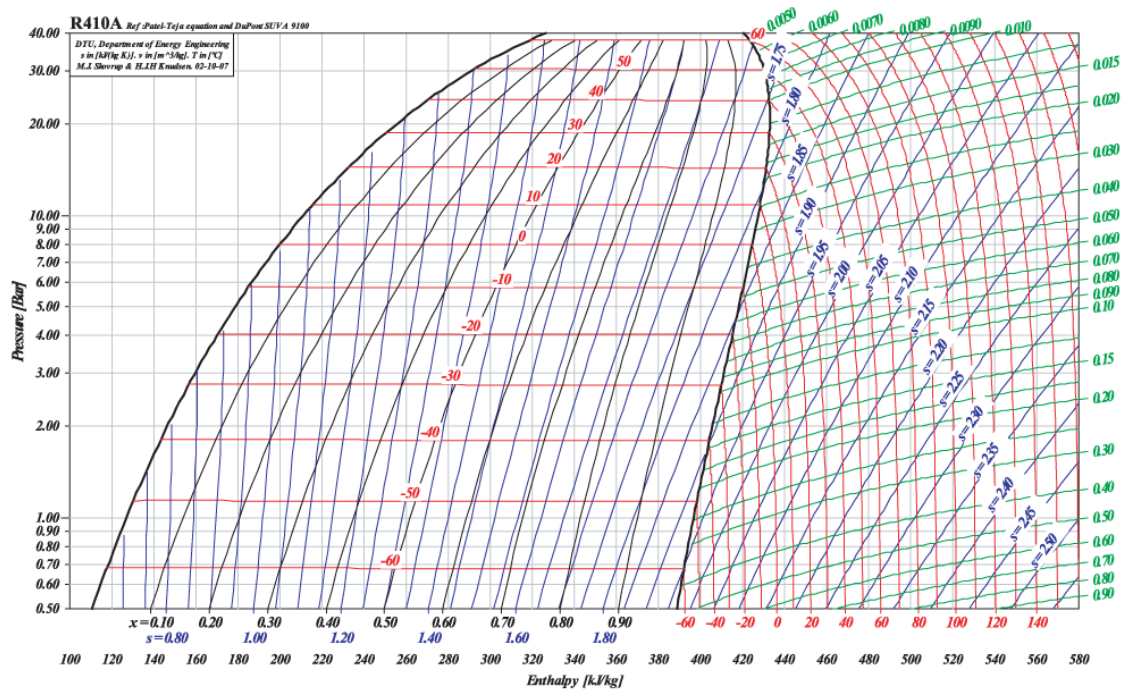


Kuva 5. Kylmäaineen R-22 log p, h-diagrammi [9].

R-22-kylmäaineen hyviä ominaisuuksia olivat palamattomuus, tehokkuus ja myrkyttömyys. R-22-kylmäaineen kiehumispiste on $-40,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, kriittinen lämpötila $+96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja kriittinen paine $4,974\text{ MPa}$. [8]

3.3 HFC-kylmäaineet

HFC-kylmäaineiden ODP-arvo on 0, mutta niillä on korkea GWP-arvo. Esimerkiksi yleisessä käytössä oleva R-410A on HFC-kylmäaine. [8] (kuva 6)



Kuva 6. R-410A-kylmäaineen log p, h-diagrammi [9].

R-410A-kylmäaine korvasi yleisesti käytössä olleen R-22-kylmäaineen. R-410A:lla on suurempi jäähdytysteho ja paine. R-410A-kylmäainetta käytetään ilmastointilaitteissa sekä lämpöpumpuissa. R-410A-kylmäaineen ODP-arvo 0 ja GWP-arvo 2088. [10]

Vuonna 2015 yleisin kaupankylmälaitteissa käytetty kylmäaine oli R404A-kylmäaine. R404A-kylmäaine korvasi R502- ja R22-kylmäaineet. R404A-kylmäaineen käyttöä saa jatkaa olemassa olevissa kohteissa vuoteen 2029 loppuun saakka. EU:n F-kaasuasetus on vuonna 2020 asettanut rajoitteen tämän kylmäaineen käytölle, mikä tarkoittaa, ettei vuoden 2020 jälkeen ole saanut rakentaa uutta kylmälaitosta R404A-kylmäaineella. R404A-kylmäaineen GWP-arvo on 3922 ja ODP-arvo 0. [10]

3.4 CO₂ eli hiilidioksidi

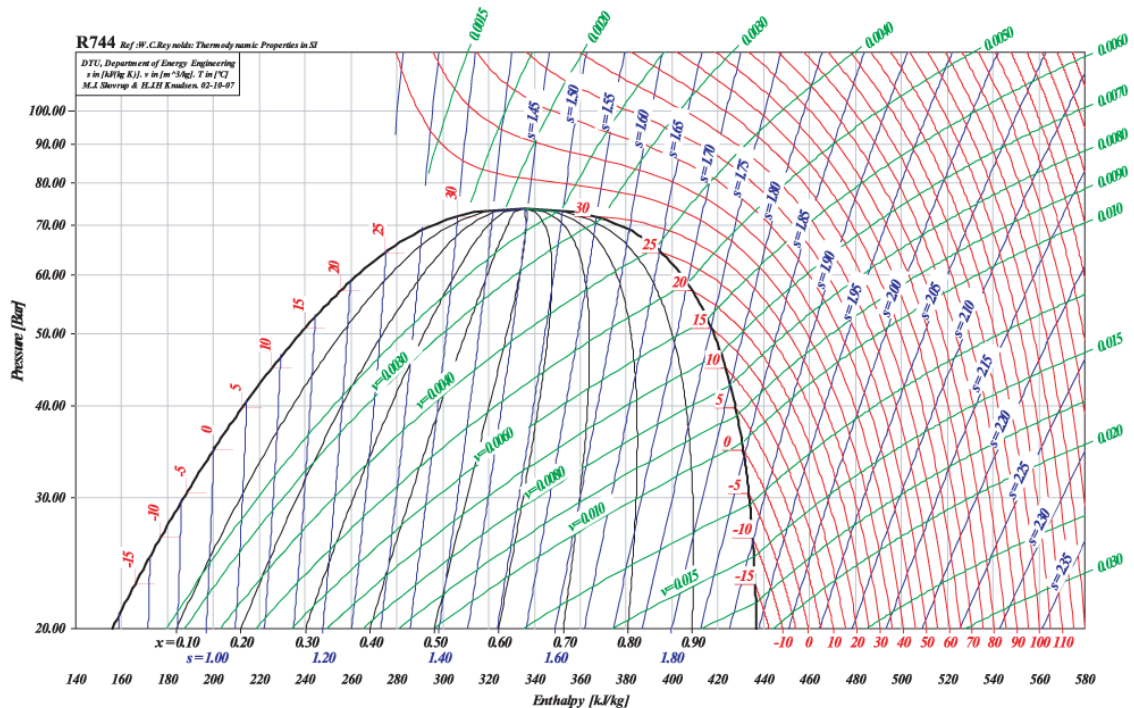
CO₂ on kemiallinen yhdiste, joka koostuu hiilestä ja hapesta. Nykypäivänä CO₂ on käytetyin kylmäaine kaupan kylmälaitoksissa. CO₂ on syrjäyttänyt muut kylmäaineet vuosien mittaan sen ympäristöystävällisyyden sekä turvallisuuden vuoksi HFC-kylmäaineiden jouduttua kieltolistalle. [7]

Suurina pitoisuuksina CO₂ on haitallista ihmiselle ja tämän takia kylmäkonehuoneet tulee varustaa CO₂ hälytinjärjestelmällä. Hälytin mittaa huoneen CO₂-pitoisuutta ja havaitessaan vuodon, kylmäjärjestelmä pysähtyy ja konehuoneen ulospuhallus laukeaa. CO₂ on luokiteltu EN 378:n mukaan ryhmiin A1/L1 (vain hieman myrkyllinen ja ei palava). [7]

Taulukko 1. CO₂-pitoisuuden myrkyllisyys [7].

370 ppm (0,037 %)	Pitoisuus ilmakehässä.
5.000 ppm (0,5 %)	Kaasuhälytyksen yläraja (evakuointi).
20.000 ppm (2 %)	Ei ongelmia lyhyestä altistumisesta.
30.000 ppm (3 %)	Epämukavuutta, vaikeuksia hengityksessä, kohonnut pulssi, päänsärkyä, sekavuutta sekä ajan ja paikan tajunnan hämärtymistä.
100.000 ppm (10 %)	Tajuttomuus ja kuolema.

Kauppojen kylmäjärjestelmissä on hiilidioksidia noin 300 kg. Hiilidioksidia kutsutaan luonnolliseksi kylmäaineeksi, koska sitä esiintyy luonnostaan ilmakehässä noin 0,04 % (400 ppm). Hiilidioksidi eroaa perinteisistä kylmäaineista (kuva 7) alhaisen kriittisen lämpötilan ja korkean paineen takia.



Kuva 7. CO₂ (R744) log p, h-diagrammi [9].

4 Kaupan CO₂-kylmälaitos

Kaupan kylmälaitokset toteutetaan yleensä boosterikoneikolla. Kuvassa 8 on boosterikoneikko, joka koostuu viidestä (5) korkeapainepuolen (MT) kompressorista ja kolmesta (3) matalapainepuolen (LT) kompressorista.

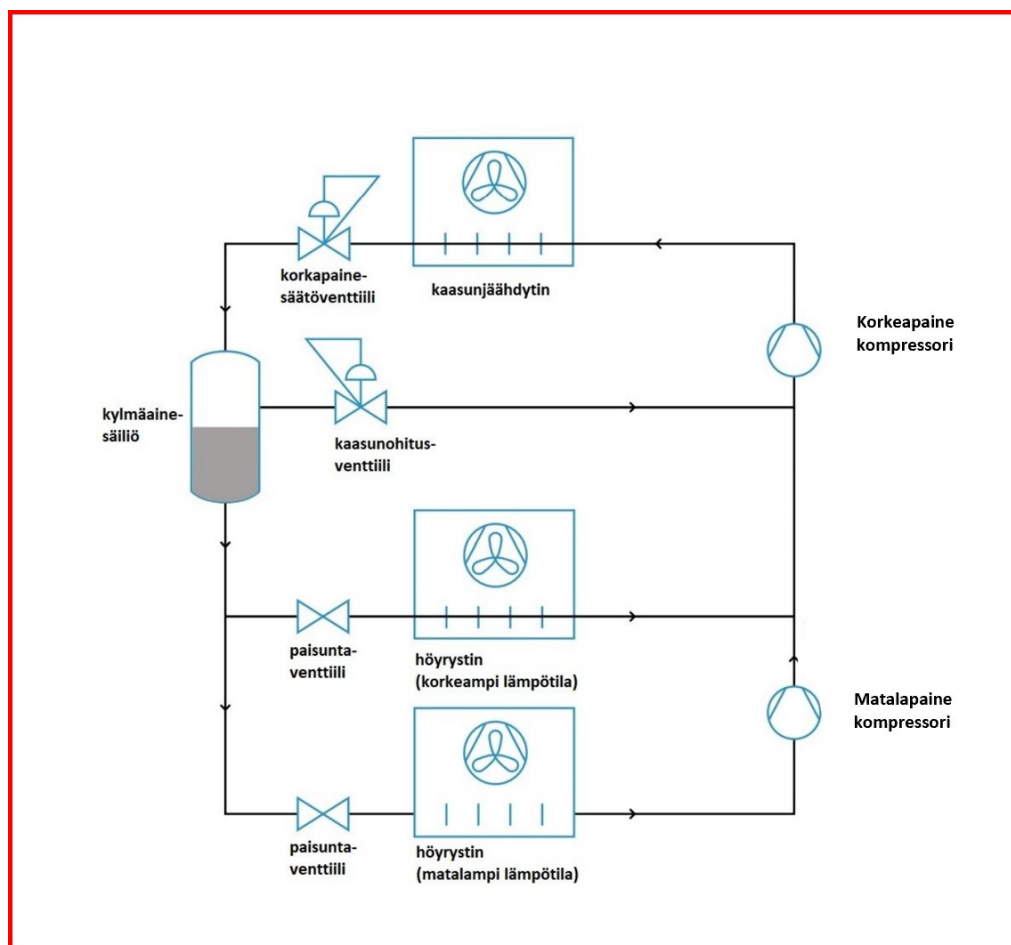


Kuva 8. Market-kokoluokan boosterikoneikko.

Kuvan boosterikoneikko on kuusi (6) metriä pitkä konepukki, jonka sisään mahtuu kahdeksan (8) kompressoria, yksi (1) nestevaraaja, kolme (3) taajuusmuuttajaa ja koko muu kylmäprosessia ylläpitävä tekniikka.

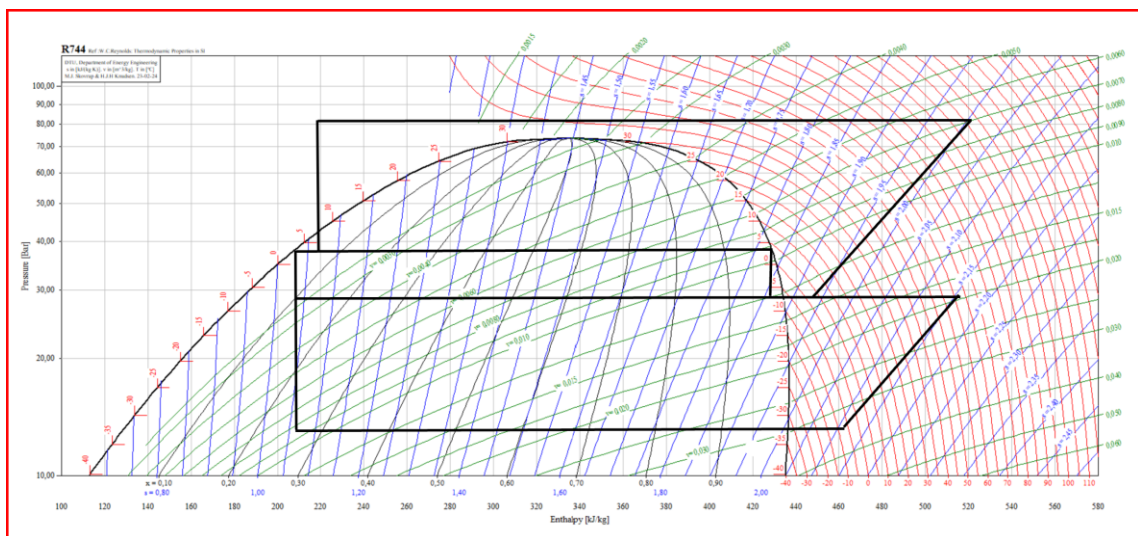
4.1 Boosterkoneikko

Suomessa ulkolämpötilan muutokset vaikuttavat monella tavalla hiilidioksidilla toimivan kylmäkoneiston toimintaan. Optimaalisen lämpötilan ylläpitäminen kylmäkalusteilla kesällä vaatii enemmän työtä kompressoreilta, jolloin kylmäprosessi toimii ylikriittisenä. Talvisin myymälässä ei esiinny kosteutta, eikä jäähdytystä tarvita ja kylmäprosessi toimii pääsääntöisesti alikriittisenä. Kesäkaudella kylmäprosessista saisi lämpöä talteen erittäin paljon, mutta kesällä lämmitystarvetta ei ole, joten ylimääräinen lauhdelämpö ajetaan kaasujäähdyttimen kautta ulkoilmaan. Kuvassa 9 on esitetty yksinkertaistettu boosterkoneikon kytkentäperiaate.



Kuva 9. Yksinkertainen boosterkoneikon kytkentäkaavio [11].

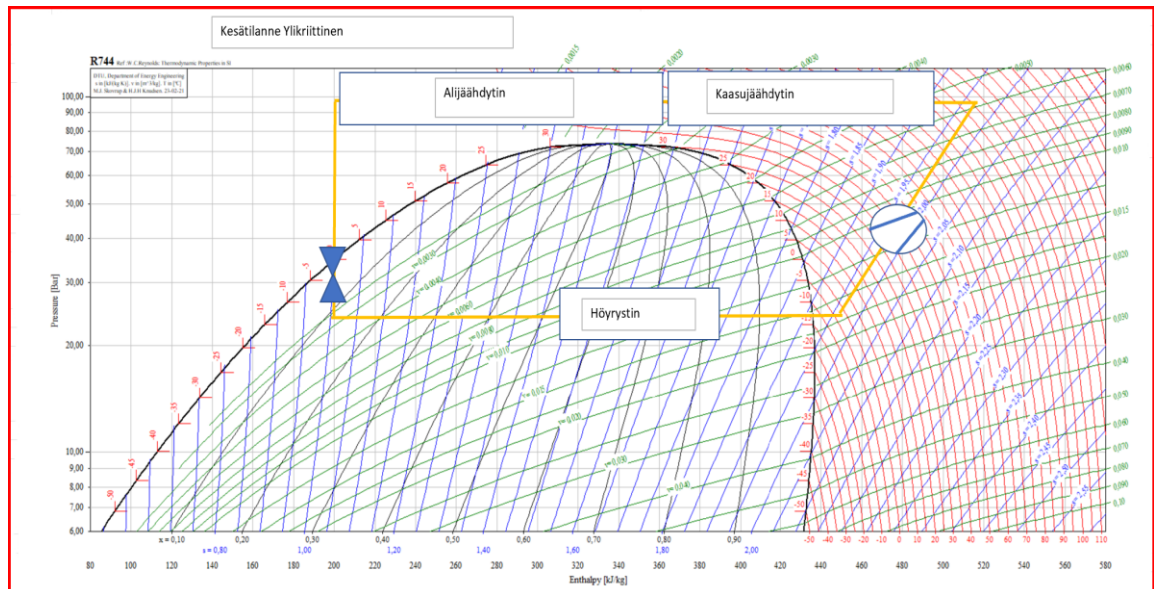
Konepukkiin asennettu booster-koneikko sijoitetaan aina koneikkoa varten rakennettuun kylmäkonehuoneeseen. Koneikko koostuu useammasta rinnan kytketystä kompressorista, joita ohjataan on-off periaatteella tai taajuusmuuttajalla. Matalapainepuolella jäähdytetään pakastuhuoneita ja pakastekalusteita (lämpötilat $-18...-21\text{ °C}$) ja korkeapainepuolella kylmiöitä ja kylmäkalusteita (lämpötilat $+10...0\text{ °C}$). Matalapainepuolella (LT) höyrystinpaineet ovat noin 15 bar ja korkeapainepuolella (MT) vastaavasti noin 30 bar. Ylikriittisessä käyttötilanteessa (kesällä) lauhdutinpaine on noin 85 bar ja lämpötila kompressorin jälkeen noin $100...110\text{ °C}$. Ylikriittisessä tilanteessa hiilidioksidi ohjataan kompressoreilta ulkoilmassa sijaitsevaan kaasujäähdytimeen. Kaasujäähdytintä voi olla ilma- tai nestejäähdytteinen. Nestemäinen hiilidioksidi syötetään kupariputkistoa pitkin kylmäkonehuoneessa sijaitsevista nestevaraajista matala- ja korkeapainepuolen höyrystimien paisuntaventtiileille. Kuvassa 10 on esitetty periaatekuva booster-koneikosta log p, h-piirroksessa, kun käytetään alijäähdytintä.



Kuva 10. Booster-koneikon kylmäprosessi log p, h-piirroksella, kun käytössä on alijäähdytintä.

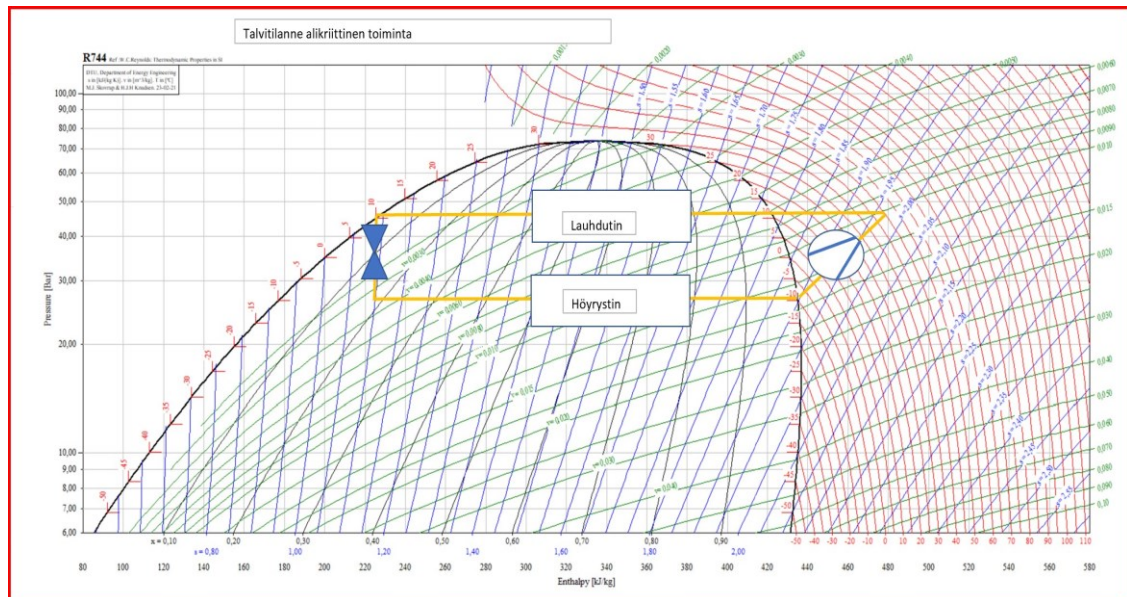
Siirryttäessä ylikriittiseen prosessiin (kesätilanteessa) tulistuksen poistin ohitetaan ja kuumakaasu ajetaan suoraan kompressoreilta kaasujäähdytimeen ja kaasujäähdyttimeltä alijäähdytimeen, jolloin leimahduskaasun määrä saadaan pienennettyä. Ylikriittisesti ajettaessa paineet ovat korkealla, ja koneita ajetaan

kesäisin pääsääntöisesti ylikriittisellä tilanteella, jolloin lämmitystarvetta ei ole. Kuvassa 11 on esitetty periaatekuva boosterikoneikosta, kun käytetään alijäähdytintä.



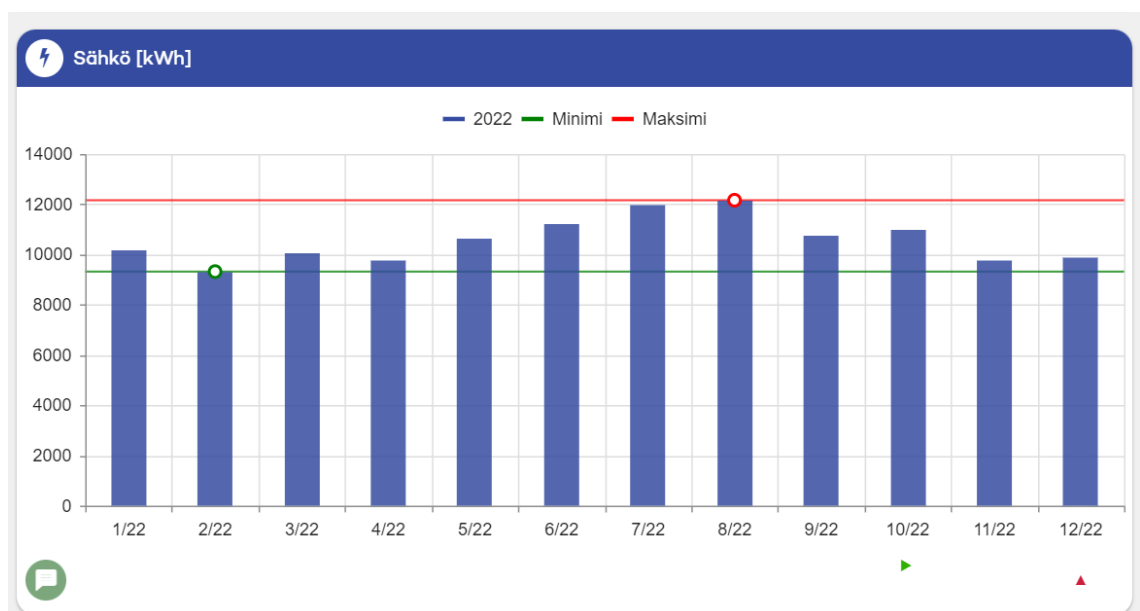
Kuva 11. Periaatekuva ylikriittisestä prosessista MT-puolella, kun käytössä on alijäähdytin ja tulistuksen poistin on ohitettu.

Alikriittisesti ajettaessa hiilidioksidilaitoksen kylmäprosessi näyttää samalta, kuin muidenkin kylmäaineiden prosessit. Alikriittisessä tilanteessa paineet pysyvät maltillisina verrattuna ylikriittiseen tilanteeseen. Alikriittisen tilanteessa lauhdepaineet ovat alle 70 bar, mikä eroaa muiden kylmäaineiden paineista suuresti. Kuvassa 12 on esitetty periaatekuva alikriittisestä tilanteesta.



Kuva 12. Periaatekuva MT-puolesta alikriittisestä tilanteesta.

Kuvassa 13 on esitetty todellinen energiankulutus kuukausitasolla ja selvitetty, kun koneita ajetaan ali- ja ylikriittisenä alijäähdyttimen kanssa. (minimi = alikriittinen tilanne ja maksimi = ylikriittinen tilanne)



Kuva 13. Kompressoreiden sähkönkulutus vuonna 2022 [12].

Kuvan 13 mukaan talvikaudella kompressoreiden sähkönkulutus on ollut 10 000 kWh, kun taas kesäkaudella kulutus on ollut noin 12 000 kWh. Kylmälaistosta ei ajeta lauhdelämmön talteenoton takia ylikriittisenä ympäri vuoden, koska ylikriittisessä tilanteessa kompressorien sähkönkulutus on suurempi (puhutaan sähköenergian hinnalla ostetusta lämmöstä) ja kesällä lämmöntarve on vähäistä.

4.2 Leimahduskaasu (flashgas)

Leimahduskaasu (flashgas) syntyy kylmäaineen olomuodon muutoksessa, kun kylmäaineen tila laskee alle kylläisen nesteen rajakäyrän. Leimahduskaasun määrä pyritään pitämään mahdollisimman pienenä kylmäprosessissa. [13]

Leimahduskaasu on nestevaraajan yläosassa olevaa kaasua, joka ohjataan erillisen varaajapainesäätöventtiilin läpi korkeapainepuolen (MT) kompressoreiden imupuolelle (kuva 9). Mitä enemmän prosessissa on leimahduskaasua, sitä suurempaa työtä MT-kompressorit tekevät. Leimahduskaasun määrää voidaan vähentää ajamalla hiilidioksidi tulistuksen poiston jälkeen alijäähdyttimen läpi. Mitoitusolosuhteissa leimahduskaasun määrä on alijäähdytintä käyttäessä 34 % pienempi, kuin ilman alijäähdytintä eli alijäähdyttimellä on merkittävä vaikutus leimahduskaasun määrään ja kompressorien sähkönkulutukseen.

Etenkin ylikriittisessä tilanteessa leimahduskaasun määrä kylmäainekierrossa on suuri, ja hiilidioksidi ajetaan siksi kaasujäähdytimeen ja sen jälkeen alijäähdyttimen kautta, jolloin hiilidioksidi palaa takaisin kyllästymispisteen raja-arvoihin. Alijäähdytimeen tulevan kylmäaineen lämpötila on noin 50 °C. Alijäähdyttimenä toimii vastavirtaperiaatteella toimiva levylämmönsiirrin. Alijäähdyttimessä kylmäainetta jäähdytetään lauhdelämpöpumpun höyrystimessä kiertävällä etyleeniglykolilla. Lauhdelämpöpumpulta tulevan nesteen lämpötila on noin 5 °C. Lauhdelämpöpumppu mahdollistaa kylmäaineen riittävän jäähtymän.

5 Lauhdelämpöpumppu

5.1 Lauhdelämpö

Liikekiinteistöissä voidaan lauhdelämpöpumpulla nostaa matalalämpöisen lauhteen lämpötila korkeammalle lämpötilatasolle, jolloin talteen otettu lauhdelämpö on hyödynnettävissä paremmin. Liikekiinteistöjen lauhdelämmön määrä on suhteellisen suuri, ja lauhdelämpöpumpun asentaminen kylmäkoneikon kanssa sarjaan parantaa lauhteen hyötykäyttöä ja pienentää lämpöenergian ostotarvetta. Lauhdelämpöpumpun rinnalle tarvitaan yleensä toinen lämmönlähde, kulutus-
huippuja sekä käyttöveden lämmittämistä varten. Kuvassa 14 on esitetty lauhdelämpöpumppu, jossa kylmäaineena on propaani.



Kuva 14. Lauhdelämpöpumppu, jonka kylmäaineena on propaani.

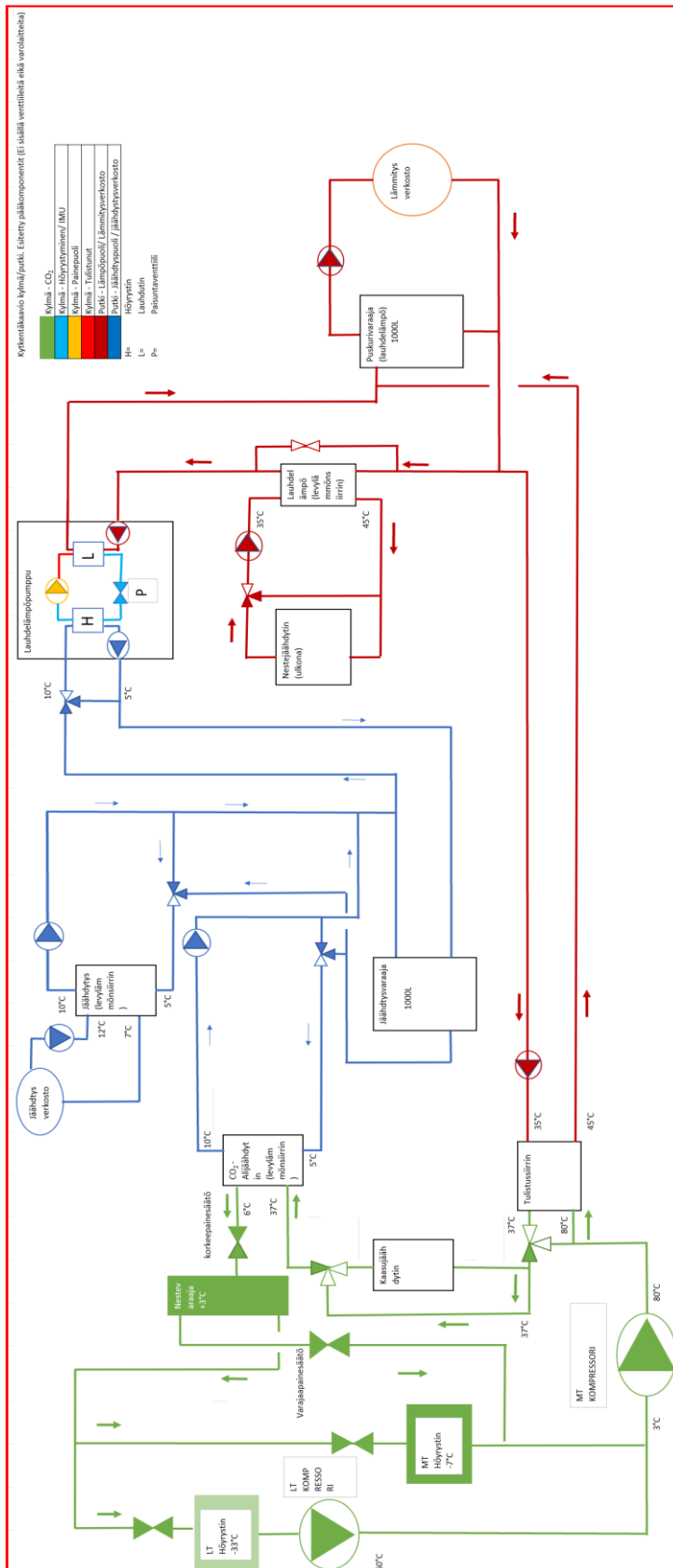
Propaanin takia lauhdelämpöpumpussa on EX-suojattu ulkokuori, jotta mahdollisen kylmäainevuodon tapahtuessa vältetään herkästi syttyvän kylmäaineen räjähdys kylmähuoneessa. Lauhdelämpöpumppu on varustettu lisäksi erillisellä EX-poistopuhaltimella; propaanin vuotaessa poistopuhallin puhalttaa propaanin pois konehuoneesta.

5.2 Lauhdelämpöpumpun kytkentä booster-koneikkoon

Lämmityskaudella ja koneikon toimiessa oikein ajetaan lauhdelämpö erillisille lauhdelämmönsiirtimille, jonka tarkoituksena on siirtää kylmäaineessa oleva lämpö kiinteistön lämmitysjärjestelmään. Kytkemällä lauhdelämpöpumppu sarjaan, korotetaan lauhtunut lämpö hyvällä hyötysuhteella. Muun lämmönlähteen tarve pienenee.

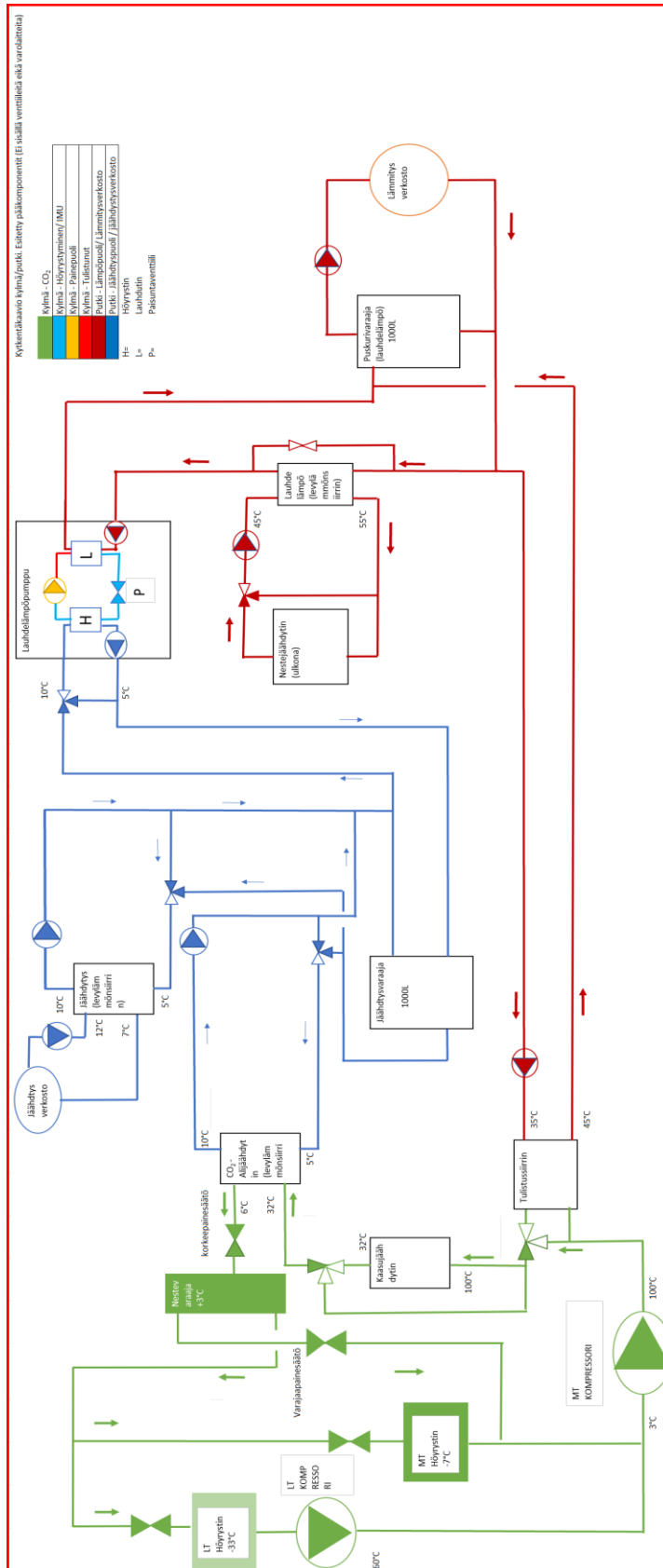
CO₂-booster-koneiston korkeapainekompressorin jälkeen eli kuumakaasuputkesta saadaan lämpö siirrettyä tulistuslämmönsiirtimellä suoraan lämmityspiiriin. Tulistuksen poiston jälkeen hiilidioksidi ohjataan erilliseen alijäähdytimeen (lauhdutin), jossa loput lämmöstä siirretään lämpöpumpulla samaan lämmityspiiriin. Lämmityskaudella kaasunjäähdytin/lauhdutin ohitetaan ja kaikki lauhdelämpö hyödynnetään kiinteistön lämmitystarpeisiin. Lämmityskauden toiminta on esitetty kuvassa 15.

Lämmöntalteenottotilanteessa korkeapainepuolen (MT) lauhtumislämpö on noin 80 °C. Prosessissa kylmäaine (CO₂) virtaa tulustussiirtimen läpi ja kaasujäähdytin ohitetaan. Hiilidioksidi virtaa alijäähdyttimen kautta ja näin saadaan kaikki lämpö kiinteistön lämmitystarpeisiin. Mikäli ulkolämpötila sallii, järjestelmää ajetaan alikriittisenä. Tällöin CO₂ lauhtuu ja alijäähdyty lisää erillisessä alijäähdyttimessä kompensoiden tässäkin käyttötilanteessa flashgas-määrää. Alijäähdyttimellä saadaan flash-kaasun määrä pidettyä alhaisena, jolloin myös kylmälaitoksen hyötysuhde paranee.



Kuva 15. Lauhdelämpöpumpulla varustetun boosterikoneikon toiminta talvitilanteessa.

Kesätilanteessa korkeapainepuolen (MT) kuumakaasun lämpötila on noin 100 °C. Prosessissa ohitetaan tulistuksen poistin ja hiilidioksidi ajetaan kaasujäähdyttimen ja alijäähdyttimen kautta. Kesällä kiinteistön jäähdytystarve kasvaa, jolloin lauhdelämpöpumpulla tehdään myös jäähdytystä. Kaasujäähdyttin/lauhdutin toimii kesäaikaan, kun järjestelmä käy ylikriittisenä lähinnä tulistuksenpoistimena. Kaasujäähdyttimen jälkeen CO₂ ohjataan alijäähdyttimeen, millä vältetään prosessissa muuten syntyvä flashgas. Kesäaikainen toiminta on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Lauhdelämpöpumpulla varustetun booster-koneikon toiminta kesätilanteessa.

6 Laskelmat

Liitteiden 2–4 laskelmissa on käytetty seuraavia kaavoja.

Lämpökertoimella kuvataan lämpöpumpun höytysuhdetta, joka kuvaa sähköteholla tuotettua lämpöä. Sähköteho kuluu kompressorin puristustyöhön. Lämpöpumpun vuotuinen lämpökerroin (COP) voidaan laskea kaavalla 1 [14]

$$COP = \frac{\text{Tuotettu lämpö (kWh)}}{\text{Käytetty sähkö (kWh)}} \quad (1)$$

Hetkellinen lämpökerroin (COP) tietyssä toimintaolosuhteessa voidaan laskea kaavalla 2 [14]

$$COP = \frac{\phi_l}{P_k} = \frac{\Delta h_l}{\Delta h_k} \quad (2)$$

jossa

ϕ_l	lämpöpumpun lämpöteho, kW
P_k	kompressorin sähköteho (ottoteho), kW
Δh_l	entalpianmuutos lauhduttimessa, kJ/kgK
Δh_k	entalpianmuutos kompressorissa, kJ/kgK

Teoreettinen maksimiarvo lämpökertoimelle voidaan laskea kaavalla 3 [14]

$$COP_C = \frac{T_l}{T_l - T_h} \quad (3)$$

jossa

T_l	lauhtumislämpötila, K
T_h	höyrystymislämpötila, K

Lauhdutusteho voidaan laskea kaavalla 4

$$Q_l = Q_h + P_k \quad (4)$$

jossa

Q_l	lauhdutusteho, kW
Q_h	höyrystinteho, kW
P_k	kompressorin ottoteho, kW

Höyrystinteho voidaan laskea kaavalla 5

$$Q_h = \Delta h_h \times m \quad (5)$$

jossa

Q_h	höyrystinteho, kW
Δh_h	entalpianmuutos höyrystimessä, kJ/kgK
m	massavirta, kg/s

Kompressorin ottoteho voidaan laskea kaavalla 6

$$P_k = m \times \Delta h_k \quad (6)$$

jossa

P_k	kompressorin ottoteho, kW
m	massavirta, kg/s
Δh_k	entalpianmuutos kompressorissa, kJ/kgK

Höyrytimen entalpiamuutos voidaan laskea kaavalla 7

$$\Delta h_h = \frac{Q_h}{m} \quad (7)$$

jossa

Δh_h höyrytimen entalpiamuutos, kJ/kgK

Q_h höyrytinteho, kW

m massavirta, kg/s

Kompressorin entalpiamuutos voidaan laskea kaavalla 8

$$\Delta h_k = \frac{P_k}{m} \quad (8)$$

jossa

Δh_k kompressorin entalpiamuutos, kJ/kgK

P_k kompressorin ottoteho, kW

m massavirta, kg/s

Kokonaismassavirta voidaan laskea kaavalla 9 tai 10

$$m_{kok} = m_{LT} + m_{MT} + m_{FG} \quad (9)$$

$$m_{kok} = \frac{P_{kMT}}{\Delta h_k} \quad (10)$$

jossa

m_{kok} kokonaismassavirta, kg/s

m_{LT} matalapainepuolen massavirta, kg/s

m_{MT} korkeapainepuolen massavirta, kg/s

m_{FG}	flashgas massavirta, kg/s
P_{kMT}	korkeapainepuolen kompressorin ottoteho, kW
Δh_k	kompressorin entalpianmuutos, kJ/kgK

Matala- tai korkeapainepuolen massavirta voidaan laskea kaavoilla 11 tai 12

$$m = \frac{Q_h}{\Delta h_h} \quad (11)$$

$$m = \frac{P_k}{\Delta h_k} \quad (12)$$

jossa

m	massavirta, kg/s
Q_h	höyrystinteho, kW
Δh_h	höyrystimen entalpianmuutos, kJ/kgK
P_k	kompressorin ottoteho, kW
Δh_k	kompressorin entalpianmuutos, kJ/kgK

Kompressorin kuluttama sähköteho voidaan laskea kaavalla 13

$$Kulutettu\ sähköteho\ (kWh) = P_k \times t \quad (13)$$

jossa

P_k	kompressorin ottoteho, kW
t	aika, (h) /a

Laskennat on tehty vuoden 2022 säädäntä mukaisilla lämpötilan pysyvyyksillä Helsinki-Vantaan säädäntä tiedoilla [15]. Sähkön keskihinta vuonna 2022 oli 19 snt/kWh. Laskelmissa on oletettu, että prosessia ajetaan ylikriittisenä ulkoilma- lämpötilasta riippumatta, jotta flashgas-kaasun määrä olisi mahdollisimman suuri. Kompessoreita on yhteensä kahdeksan (8), korkeapainepuolen kompressoreita viisi (5) ja matalapainepuolen kompressoreita kolme (3). Kesän mitoitustilanteessa (ulkoilman lämpötila +30 °C), kaikki kompressorit ovat käynnissä. Talven mitoitustilanteessa (ulkoilman lämpötila -30 °C) käy kaksi (2) korkeapainepuolen ja kaksi (2) matalapainepuolen kompressoria. Kompressorien sähkön ottoteho on suhteellinen massavirran ja entalpiaerojen kanssa. Taulukossa 2 on esitetty liitteiden 2–4 avulla vuositasolla syntyvät erot, kun boosterikoneikossa on alijäähdytintä tai kun sitä ei ole.

Taulukko 2. Alijäähdyttimen vaikutus MT- kompressorien massavirtaan, ottotehoon ja energiankulutukseen sekä vuodessa saavutettavissa oleva ostoenergian säästö.

massavirta (kg/s)	ottoteho (kW)	ostoenergiankulutus (kWh/a)	säästö (€/a)
7,61	489,4	329 092	-
6,36	408,4	296 534	-
1,245	81,1	32 558	6 186

Alijäähdyttimellä säästetty ostoenergian määrä vuodessa laskelman mukaan on 6 186 euroa, mikä vastaa energian säästönä noin 32 558 kWh: a. Alijäähdyttimen vaikutus ostoenergian kulutukseen on noin 10 %.

7 Yhteenveto

Laskelmat on tehty tietyille höyrystymislämpötiloille ja tehoille, joten ei voi olettaa, että ostoenergiassa saavutettu säästö olisi joka kohteessa yhtä suuri. Ostoenergian kulutus riippuu merkittävästi siitä, miten kylmäprosessia kohteessa ajetaan. Tehtyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että alijäähdyttimellä saavutettavissa oleva ostoenergian säästö vuositasolla voisi olla suuruusluokaltaan 6–10 %. Laskelmissa ei huomioida lauhdelämpöpumpun energiankulutusta.













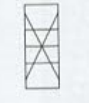








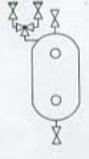















Kylmäprosessia ei voida ajaa kaikissa kohteissa samalla tavalla vaan jokainen kohde on omanlaisensa. Kylmäprosessiin vaikuttavia tekijöitä ovat kohteen sijainti, asiakasmäärä, lämpötila, kosteus ja pinta-ala. Voidaan todeta, että tehty laskelma on suuntaa antava. Jos halutaan uudiskohteen osalta laskea kokonaiskulutusta, ei sitä voida ennalta tarkkaan arvioida. Kylmäprosessi on niin monesta asiasta riippuvainen.

Lähteet

- 1 Hedberg, Kasper. 2020. Danfoss energiaoptimointi, kaupan kylmä. Danfossin energiaoptimointiesite.
- 2 Jokela, Matti. 2020. Kylmäala kylmäprosessi eli miten kylmä syntyy. Verkkoaineisto. Kylmä Extra. <https://www.kylmaextra.fi/lehdet/kylma-extra_2_2020/kylmaprosessi_eli_miten_kylma_syntyy> Luettu 14.1.2023.
- 3 Kaappola, Esko. Hirvelä, Aulis. Jokela, Matti. Kianta, Jani. 2022. Kylmätekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- 4 Aalto, Esa. Aittomäki, Antero. 2012. Kylmätekniikka. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry.
- 5 Nydal, Roald. 2008. Käytännön kylmätekniikka. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry.
- 6 Hakala, Pertti. Kaappola, Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus
- 7 Kaappola, Esko. 2022. Koulutusmateriaali. Metropolian Ammattikorkeakoulu.
- 8 Kylmäaineet ennen ja nyt. 2023. Verkkoaineisto. Algol- Chemicals. <<https://www.algolchemicals.com/fi/artikkelit/kylm%C3%A4aineet-ennen-ja-nyt>> Luettu 26.1.2023.
- 9 Log p-h kaaviot kylmäaineille. 2023. Verkkoaineisto. Swep Company. <<https://www.swep.net/refrigerant-handbook/appendix/appendix-b/>> Luettu 1.2.2023.
- 10 Kylmäaine R410A keveisiin ilmastointilaitteisiin ja lämpöpumppuihin. 2017. Verkkoaineisto. Darment. <<https://darment.fi/kylmaaine/r404a/>> Luettu 19.3.2023.
- 11 Huila, Joonas. 2020. Hiilidioksidin käyttö kylmäaineena jäähdytysprosessissa. Opinnäytetyö. Tampereen yliopisto. Trepo-tietokanta.
- 12 Enerkey. 2023. Energiaraportti S-market.
- 13 Bryan. 2022. Flash Gas. Verkkoaineisto. HVAC School. <<https://hvacschool.com/flash-gas/>> Luettu 3.3.2023.

- 14 Valkeapää, Aki. 2022. Koulutusmateriaali. Metropolian Ammattikorkeakoulu.
- 15 Säähavainnoit Helsinki - Vantaa. Avoin data. 2023. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>> Luettu 14.3.2023.

Kylmätekniset laitteet ja niiden symbolit

	Kompressori		Näkölasi kosteusindikaattorilla		Painemittari
	Lamelli-lämmönsiirrin		Äänenvaimennin		Painelähetin
	Lamellilämmönsiirrin puhaltimella höyrysti/lauhdutin		Pintavahti		Painekytin
	Putkivaippalämmönsiirrin		Pisaranerotin		Korkeapainekytin varolaite
	Levyllämmönsiirrin		Öljynerotin		Matalapainekytin varolaite
	Lämmönvaihdin imu-/nesteputki		Värinävaimennin		Painesäädin
	Vaaka nestevaraaja		Suodatin kiinteällä täytöksellä		Lämpömittari
	Pysty nestevaraaja vaihtventtiilillä ja varoventtiileillä		Suodatin vaihdettavalla täytöksellä		Lämpötila-anturi
			Palloventtiili		Lämpötilasäädin
			Sulkuventtiili		Termostaatti
			Takaiskuventtiili		Termostaatti näytöllä
			Kulmamallinen varoventtiili		Kaksipainekytin
			Vakiopaineventtiili		Öljynpaineenvartija
			Elektroninen paisuntaventtiili		
			Termostaattinen paisuntaventtiili sisäisellä painetasauksella		
			Termostaattinen paisuntaventtiili ulkoisella painetasauksella		

Kuva. Kylmätekniset laitteet ja niiden piirrossymbolit.

Laskelmien tulokset

12kk-säädata Helsinki - Vantaa		ALIJÄÄHDYTTIMEN KANSSA																								
Ulkolämpötila	lämpötilan pysyvyys (h/a)	CO ₂ nesteraara ajalle	Paine (bar)	kok. m ³ /kg/s	LT m ³ /kg/s	MT m ³ /kg/s	FG m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	LT m ³ /kg/s	MT m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	MT m ³ /kg/s	LT COP	MT COP	LT HOYRYSTIN TEHO KW	HOYRYSTIN TEHO KW	KOMPRES SORIN OTTOHE O KW	LT LAUHDUTUS TEHO KW	LT LAUHDUTUS TEHO KW	FLASH GAS OSUUS %	MT lauridituste ho	MT KWH	CO ₂ TOTAL KWH
-30,0	0,0	6,0	75,0	0,225	0,037	0,184	0,004	220,3	229,8	42,2	65,8	5,2	2,9	8,1	1,6	9,6	0,0	42,2	14,8	2%	57,0	0				
-25,0	0,0	6,0	75,0	0,251	0,039	0,207	0,005	229,9	228,3	40,5	62,5	5,7	3,0	9,0	1,6	10,6	0,0	47,3	15,7	2%	63,0	0				
-20,0	15,0	6,0	75,0	0,294	0,043	0,244	0,006	229,8	227,9	49,5	62,4	4,6	3,0	10,0	2,2	12,1	32,3	55,7	18,3	2%	74,0	275				
-15,0	58,0	6,0	75,0	0,317	0,048	0,263	0,006	229,5	228,3	48,7	66,4	4,7	2,8	11,1	2,4	13,5	136,9	60,0	21,1	2%	81,1	1222				
-10,0	357,0	6,0	75,0	0,358	0,052	0,299	0,007	229,4	228,4	50,9	63,6	4,5	3,0	12,0	2,7	14,7	949,6	68,2	22,7	2%	90,9	8121				
-5,0	1047,0	6,0	75,0	0,379	0,058	0,314	0,007	228,9	228,3	48,0	63,3	4,8	3,0	13,2	2,8	15,9	2889,7	71,8	24,0	2%	95,8	25132				
0,0	2014,0	6,0	75,0	0,449	0,065	0,375	0,009	229,6	228,3	47,9	63,5	4,8	3,0	15,0	3,1	18,1	6303,8	85,6	28,5	2%	114,1	57425				
5,0	1321,0	6,0	75,0	0,509	0,079	0,420	0,010	229,0	228,4	52,4	65,4	4,4	2,9	18,0	4,1	22,1	5442,5	96,0	33,3	2%	128,3	43930				
10,0	1660,0	6,0	75,0	0,562	0,087	0,463	0,011	229,3	228,6	52,9	64,3	4,3	2,9	20,0	4,6	24,6	7652,6	105,9	36,1	2%	142,0	59916				
15,0	1058,0	6,0	75,0	0,651	0,105	0,527	0,019	228,9	228,6	55,3	63,2	4,1	2,9	24,1	5,8	29,9	6157,6	120,4	41,1	3%	161,5	43534				
20,0	824,0	6,0	75,0	0,712	0,118	0,567	0,027	228,9	228,5	54,6	61,3	4,2	3,0	26,9	6,4	33,3	5281,8	129,6	43,7	4%	173,3	35991				
25,0	344,0	6,0	75,0	0,790	0,131	0,629	0,030	229,0	229,2	49,4	60,7	4,6	3,0	29,9	6,5	36,4	2218,8	143,7	47,9	4%	191,6	16693				
30,0	62,0	6,0	82,2	0,864	0,133	0,698	0,033	235,3	236,2	60,2	70,7	3,9	2,7	31,3	8,0	39,3	496,0	164,9	61,1	4%	226,0	3786				

Kuva. Boosterkoneikon laskelmat alijäähdyttimen kanssa.

12kk säädata Helsingin-Ventaa										Ilman alijäähdytintä															
Ulkolämpötila	lämpötilan pysyvyys (h)/a	CO ₂ it nestevara ajalle	Paine (bar)	kokk. m ³ /kg/s	LT m ³ /kg/s	MT m ³ /kg/s	FG m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	LT MT m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	Δh _h m ³ /kg/s	LT COP	MT COP	LT HOYRYSTIN TEHO KW	KOMPRESORIN OTTOTEH O KW	LAUHUTUS TEHO KW	LT KWh	MT HOYRYSTI N TEHO KW	MT HOYRYSTI N OTTOTEHO KW	FLASH OSUUS	MT lauhdutuste ho	MT KWh	CO ₂ TOTAL KWh
-30,0	0,0	10,4	75,0	0,229	0,037	0,184	0,008	220,3	229,8	229,8	42,2	65,8	5,2	2,8	2,8	8,1	1,6	9,6	0,0	42,2	15,1	4%	57,3	0	0
-25,0	0,0	10,4	75,0	0,257	0,039	0,207	0,010	229,9	229,9	228,3	40,5	62,5	5,7	2,9	2,9	9,0	1,6	10,6	0,0	47,3	16,1	4%	63,4	0	0
-20,0	15,0	10,4	75,0	0,300	0,043	0,244	0,012	229,8	229,8	227,9	49,5	62,4	4,6	3,0	3,0	10,0	2,2	12,1	32,3	55,7	18,7	4%	74,4	281	281
-15,0	58,0	10,4	75,0	0,324	0,048	0,263	0,013	229,5	229,5	228,3	48,7	66,4	4,7	2,8	2,8	11,1	2,4	13,5	136,9	60,0	21,5	4%	81,5	1247	1247
-10,0	357,0	10,4	75,0	0,365	0,052	0,299	0,014	229,4	229,4	228,4	50,9	63,6	4,5	2,9	2,9	12,0	2,7	14,7	949,6	68,2	23,2	4%	91,4	8282	8282
-5,0	1047,0	10,4	75,0	0,387	0,058	0,314	0,015	228,9	228,9	228,3	48,0	63,3	4,8	2,9	2,9	13,2	2,8	15,9	2889,7	71,8	24,5	4%	96,3	25652	25652
0,0	2014,0	10,4	75,0	0,458	0,065	0,375	0,018	229,6	229,6	228,3	47,9	63,5	4,8	2,9	2,9	15,0	3,1	18,1	6303,8	85,6	29,1	4%	114,7	58607	58607
5,0	1321,0	12,0	75,0	0,529	0,079	0,420	0,031	229,0	229,0	228,4	52,4	65,4	4,4	2,8	2,8	18,0	4,1	22,1	5442,5	96,0	34,6	6%	130,6	45707	45707
10,0	1660,0	14,0	75,0	0,601	0,087	0,463	0,050	229,3	229,3	228,6	52,9	64,3	4,3	2,7	2,7	20,0	4,6	24,6	7652,6	105,9	38,6	8%	144,5	64076	64076
15,0	1058,0	18,0	75,0	0,731	0,105	0,527	0,099	228,9	228,9	228,6	55,3	63,2	4,1	2,6	2,6	24,1	5,8	29,9	6157,6	120,4	46,2	14%	166,6	48880	48880
20,0	824,0	24,0	75,0	0,885	0,118	0,567	0,201	228,9	228,9	228,5	54,6	61,3	4,2	2,4	2,4	26,9	6,4	33,3	5281,8	129,6	54,3	23%	183,9	44743	44743
25,0	344,0	30,0	75,0	1,197	0,131	0,629	0,438	229,0	229,0	229,2	49,4	60,7	4,6	2,0	2,0	29,9	6,5	36,4	2218,8	143,7	72,7	37%	216,4	25009	25009
30,0	62,0	32,0	82,2	1,343	0,133	0,698	0,512	235,3	235,3	236,2	60,2	70,7	3,9	1,7	1,7	31,3	8,0	39,3	496,0	164,9	94,9	38%	259,8	5884	5884

Kuva. Boosterkoneikon laskelmat ilman alijäähdytintä.

VUODEN 2022 SÄÄDATA HELSINKI-VANTAA 12KK VERTAILUJAKSO										VUODEN 2022 SÄHKÖN KESKIHINTA OLI 19snt/kWh			
Ulkolämpötila °C	lämpötilan pysyvyys (h)/a	kok. Kg/s	m	kok. m Kg/s	ERO Kg/s	MT KOMPRESSORIN OTTOTEHO KW	MT KOMPRESSORIN OTTOTEHO KW	MT KOMPRESSOREIDEN OTTOTEHO ERO KW	MT kWh	MT kWh	ERO kWh	ERO %	SÄÄSTÖ €
-30	0	0,229	0,225	0,004	0,004	15,05	14,8	0,25	0	0	0	0 %	0
-25	0	0,257	0,251	0,005	0,005	16,05	15,7	0,33	0	0	0	0 %	0
-20	15	0,300	0,294	0,006	0,006	18,71	18,3	0,38	280,65	275	6	2 %	1
-15	58	0,324	0,317	0,006	0,006	21,5	21,1	0,43	1247	1222	25	2 %	5
-10	357	0,365	0,358	0,007	0,007	23,2	22,7	0,45	8282,4	8121	161	2 %	31
-5	1047	0,387	0,379	0,008	0,008	24,5	24,0	0,50	25725	25204	521	2 %	99
0	2014	0,458	0,449	0,009	0,009	29,1	28,5	0,59	59189,4	57995	1195	2 %	227
5	1321	0,529	0,509	0,021	0,021	34,6	33,3	1,34	45775,8	43997	1779	4 %	338
10	1660	0,601	0,562	0,039	0,039	38,6	36,1	2,51	64076	59916	4160	6 %	790
15	1058	0,731	0,651	0,080	0,080	46,2	41,1	5,05	48879,6	43534	5346	11 %	1016
20	824	0,885	0,712	0,173	0,173	54,3	43,7	10,6	44743,2	35991	8752	20 %	1663
25	344	1,197	0,790	0,408	0,408	72,7	47,9	24,8	25008,8	16493	8516	34 %	1618
30	62	1,343	0,864	0,479	0,479	94,9	61,1	33,8	5883,8	3786	2097	36 %	399
Kokonais summa	8760	7,61	6,36	1,245	1,245	489,4	408,4	81,0	329092	296534	32558		6186
												SÄHKÖKULUTUKSEN PIENENTYMÄ %	9,89 %
		ILMAN ALIJÄÄHDYTYNTÄ											
		ALIJÄÄHDYTIN											

Kuva. Laskelmien vertailut.