

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku/ merenkulkualan insinööri

Jussi Vähäsöyrinki

ILMASTOINNIN JÄÄHDYTYKSEN SUUNNITTELU RAUMA-LUOKAN
ALUKSILLE

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulku/ merenkulkualan insinööri

VÄHÄSÖYRINKI, JUSSI

Ilmastoinnin jäähdytyksen suunnittelu Rauma-luokan aluksille

Insinööri työ

41 sivua + 2 liitesivua

Työn ohjaaja

Lehtori Risto Korhonen

Toimeksiantaja

Merivoimat

Tammikuu 2012

Avainsanat

ilmastointi, jäähdytys, laivat, kylmäkoneistot, suunnittelu

Opinnäytetyössä käsitellään laivan ilmastoinnin suunnittelua. Työssä tutkitaan erityisesti ilmastointilaitteiston mitoittamista ja laskentaa. Tavoitteena on laatia laivojen rakennusvalvojille perusteet, joilla jäähdytysjärjestelmä mitoitetetaan. Työ auttaa saamaan kokonaiskäsityksen ilmastoinnin jäähdytyksen laskemisesta ja mitoittamisesta.

Työ jakautuu kolmeen osioon. Ensimmäisessä osiossa tarkastellaan, mitkä tekijät aiheuttavat lämpökuormaa ja mistä kaikesta se muodostuu. Toisessa osiossa tarkastellaan kylmäntekoa ja siihen liittyviä laitteita. Kolmas osio keskittyy laitteiston mitoittamiseen.

Työ perustuu suurelta osin kirjalliseen materiaaliin. Tietoa on kerätty kirjoista ja julkaisuista. Materiaalin ikä on 0 - 30 vuotta. Tunnetut järjestelmät ovat pysyneet samoina useiden vuosikymmenten aikana, joskin eletroniikka on tuonut mukaan omat vivahteensa.

Yhteenvedon voidaan todeta, että laitteiston mitoittaminen on todella haasteellista. Huomioon otettavia tekijöitä löytyy runsaasti kaikista laitteista ja osista. Suunnittelijan haasteet kulmineituvat laitevalintoihin ja niiden tuomiin kompromisseihin. Vaikka laitteisto on yksinkertainen, aiheuttavat uudet kylmäaineet omat haasteensa uusien laitoksien suunnittelulle.

ABSTRACT

KYMENLAAKSO UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Marine Technology

VÄHÄSÖYRINKI, JUSSI

Air Conditioning Cooling Design of Rauma-class Ships

Bachelor's Thesis

41 pages + 2 pages of appendices

Supervisor

Risto Korhonen, Lecturer

Commissioned by

Finnish Navy

January 2012

Keywords

air-conditioning, refrigeration, ship, refrigeration
machinery, planning

This thesis deals with the ship's air-conditioning design. In this thesis is studying particularly air-conditioning equipments sizing and counting. The aim is to establish a criteria to administrators of shipbuilding, with the cooling system is planning. The thesis helps to obtain an overall understanding of the cooling calculation and dimensioning.

The thesis is divided into three sections. The first section examines the factors that cause heat stress and what it consists of. The second section examines the cold stage and related equipment. The third section focuses on the hardware for the design.

The thesis is largely based on written material. Information was gathered from books and publications. Material age is 0 - 30 years. Known systems have remained unchanged for several decades but the electronics has its own flavor.

It can be concluded that the hardware sizing is a very challenging job. Factors to be considered can be found in all devices and components. Designer represents the culmination of the challenges and choices of equipment they bring to compromise. Although the hardware is simple, new refrigerants brings own challenges to the design of new plants.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	6
1.1	Työn aihe ja tavoitteet	6
1.2	Rauma-luokan ohjusveneen MLU (Mid Life Update)	6
2	LÄMPÖKUORMA	7
2.1	Ulkopuolinen lämpökuorma	9
2.2	Sisäinen lämpökuorma	10
3	KYLMÄ- JA LÄMPÖPUMPPULAITOS JA SEN KOMPONENTIT	14
3.1	Kompressori	14
3.2	Paisuntaventtiili	16
3.3	Höyrystin	18
3.4	Lauhdutin	19
4	JÄÄHDYTYS- JA KYLMÄJÄRJESTELMÄT	19
4.1	Suorajäähdytysjärjestelmä	20
4.1.1	Kuivahöyrystys	20
4.1.2	Märkähöyrystin	21
4.2	Välillinen jäähdytys	22
5	KYLMÄAINEEN VALINTA	24
6	KYLMÄKONEISTON MITOITUS	25
6.1	Nestejäähdytteisen höyrytumen valinta	26
6.2	Kompressorin valinta	26
6.3	Lauhduttimen mitoitus	27
6.4	Putkiston mitoitus	28
6.5	Liuospumun ja putkiston mitoitus	35
6.6	Paikallisjäähdyttimen mitoitus ja tehonsäätö	37
7	HUOLTO	38

8 YHTEENVETO	39
LÄHTEET	42
LIITTEET	43

Liite 1. Mollier-diagrammi

Liite 2. Putkimitoitustaulukko R407C

1 JOHDANTO

1.1 Työn aihe ja tavoitteet

Opinnäytetyön lähtökohtana on Rauma-luokan ohjusveneiden peruskorjaus. Peruskorjauksella haetaan laivan elinkaaren jatkamista. Aluksen telakoinnissa työskentelee laivan edustajana rakennusvalvoja, joka valvoo töitten toteutumista ja toimivuutta. Rakennusvalvojalla tulee olla hyvä laitetuntemus, jotta hän pystyy valvomaan töitä. Tällä opinnäytetyöllä on tarkoitus tukea rakennusvalvojan kylmäkoneiston tuntemusta laitteistosta ja sen suunnittelusta.

Työn tarkoituksena on selvittää laivan jäähdyttämiseen käytettävän laitteiston mitoittamisperusteet. Tarkoituksena on käsitellä ja laskea, mistä laivan lämpökuorma syntyy ja millaisilla laitteistolla se saadaan siirrettyä pois. Työssä käsitellään pääosin laivan jäähdytystä, mutta se toimii myös maarakennuksiin pienin muutoksin. Työssä on keskitytty lähinnä välilliseen jäähdytykseen, koska se on ainoa vaihtoehto jäähdytettäessä asuintiloja. Tarkoituksena on käsitellä laajasti koko järjestelmän mitoittamista, joten komponenttien yksityiskohtaiseen mitoittamiseen ei ole perehdytty. Työssä keskitytään tarkasti vain kylmäntarpeen laskentaan. Koska työn tilaaja on merivoimat, kaikki lukuarvot on jouduttu jättämään pois turvallisuusluokituksen vuoksi.

1.2 Rauma-luokan ohjusveneiden MLU (Mid Life Update)

Rauma-luokan ohjusveneet rakennettiin 1990-luvun alussa Hollmingin telakalla Raumalla. Käyttöaste on noussut sen aikaisista suunnitelmista ja tehtäväkenttä on laajentunut kattamaan koko Itämeren alueen. Operatiivista käyttöä on tarkoitus jatkaa tulevaisuudessa suorittamalla koko alusluokalle MLU (Mid Life Update) eli aluksen keski-ikässä tehtävä päivitys. Suurimmat uudistukset kohdistuvat aseteknisiin järjestelmiin. Laiva-alan työt koostuvat pienistä parannuksista. Suurimpana uudistuksena on ilmastoinnin uudelleen rakentaminen. Uudistuksien tarkoituksena on lisätä merelläoloaikaa ja toimintaedellytyksiä Itämeren alueella.



Kuva 1, Ohjusvene Rauma(Wikipedia)

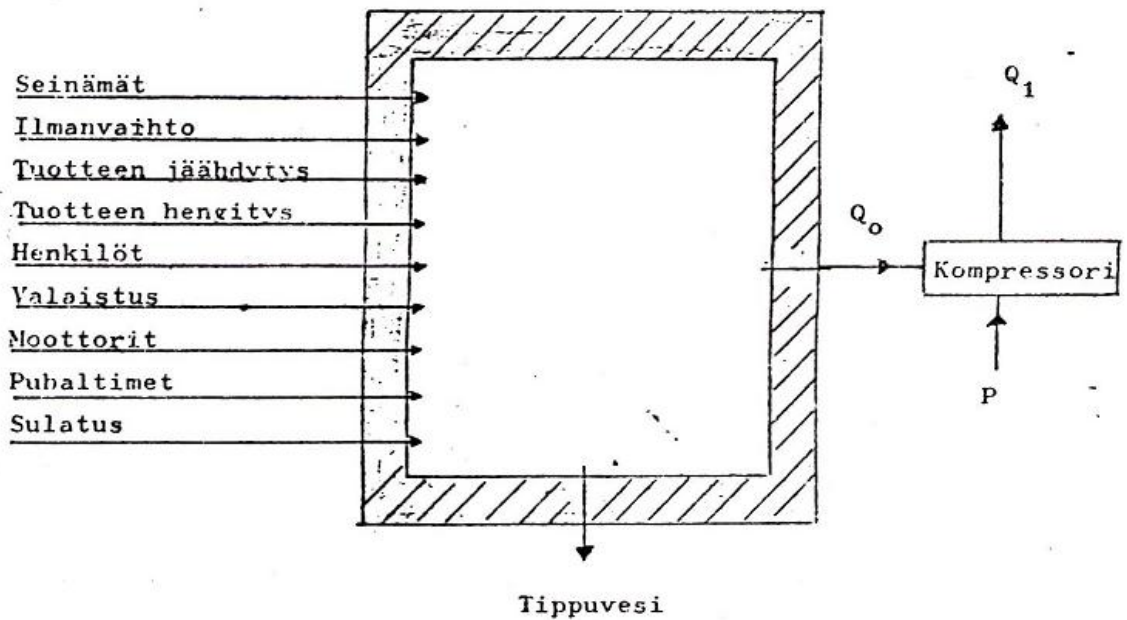
Tällä hetkellä aluksen ilmanvaihto ja jäähdytys on todettu riittämättömäksi suhteutettuna aluksella majoittuvaan henkilömäärään. Alkuperäisissä suunnitelmissa alus oli suunniteltu yksivahtialukseksi. Nykyisin alus toimii kaksivahtialuksena, jolloin pystytään olemaan merellä pitempiä aikoja. Ulkoilman lämpötilan noustessa yli +20 asteen ja auringon paistaessa naamiomaalattuun kanteen, alkaa sisälämpötila nousta pitkästi yli +30 asteen. Tämä johtaa henkilöstön toimintakyvyn laskuun ja vaikuttaa suoraan suorituskykyyn. Lisäksi aluksella on paljon eletroniikkaa, joka vaatii hyvän jäähdytyksen ympäri vuoden.

Nykyisessä ilmastoinnissa ei ole varsinaista tuloilman jäähdytystä. Ainoa aluksen jäähdytysjärjestelmä (Carrier) on tarkoitettu lähinnä eletroniikan ja tärkeimpien tilojen jäähdytykseen. Tulevassa MLU-projektissa on tarkoituksena uudistaa nykyinen jäähdytysjärjestelmä ja rakentaa toinen järjestelmä tuloilman jäähdytykseen.

2 LÄMPÖKUORMA

Aluksen asunto-osaston lämpökuorma lasketaan kuten muidenkin tilojen, mutta käytännössä tilanne on erilainen kuin laskettaessa asuinrakennusten lämpökuormaa. Aluksen lämpökuormaa laskettaessa suurin osa kuormasta tulee ulkopuolelta, varsinkin kesäaikaan. Ihmisten ja valaistuksen yms. merkitys jää varsin pieneksi,

mutta nekin otetaan huomioon, koska majoitustilat ovat pienet.



Kuva 2. Energian siirtymiset tilassa (Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981, II/2)

Laiva toimii lähes samanlaisena systeeminä kuin mikä tahansa kylmähuone tai kylmävarasto. Termodynamiikan 1. säännön mukaan energiaa ei voida luoda tai hävittää, ainoastaan muuttaa muodosta toiseen. Vaikka energia tuodaan lämmön ja muun energiamuodon muodossa, se muutetaan laskennassa lämpöenergiaksi. Tällöin täytyy syntynyt lämpökuorma siirtää pois kylmäkoneen avulla meriveteen tai takaisin ilmaan. (Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981, II/2)

Aluksen kylmäntarpeeseen eniten vaikuttavat tekijät ovat:

- lämmön siirtyminen seinien läpi
- ilmanvaihdosta aiheutunut kuormitus
- valaistus
- henkilöt
- laitteet (eletroniikka, sähkömoottorit)

(Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981, II/2)

2.1 Ulkopuolinen lämpökuorma

Ulkoisen lämpökuorma muodostuu suurimmalta osin kesäaikaan, jolloin auringon lämpöenergia siirtyy rakenteiden läpi laivan sisälle. Auringon merkitys korostuu, kun otetaan huomioon rakennusmateriaali ja maalipinnan tummuus. Laivanrakennuksessa käytettävän seosalumiinin (AlMg4.5Mn) lämmönjohtavuus λ (lamda) on 120 W/mK. Kun tätä verrataan esimerkiksi puuhun $\lambda=0,12\text{W/mK}$ ja vuorivillaan $\lambda= 0,037\text{W/mK}$, voi hyvinkin huomata, että alumiini johtaa lämpöä erittäin hyvin. Suuri lämmönjohtavuus aiheuttaa merkittävästi lämpökuormaa ilmastoinnille. Toinen merkittävä tekijä on ulkopinnan maalaus. Taulukosta 1 voidaan todeta, että tummalla maalipinnalla on varsin suuri merkitys lämpökuormaan. (Australwright metal datasheets) (Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981, III/29) (Hakala 2005, 35)

Ulkoseinän tai katon kautta tapahtuva lämmönsiirtyminen sisälle voidaan laskea kaavalla:

$$Q_l = U * A_{kok} * (T_u - T_s) * 24h / vrk / 1000$$

Q_l kyljen ja kannen kautta tapahtuva lämpösiirto (kWh/vrk)

U rakenteen k-arvo ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

A_{kok} jäädytettävien tilojen kylkien ja kannen yhteispinta-ala (m^2)

T_u ulkolämpötila (°C)

T_s sisälämpötila (°C)

$$A_{kok} = A_{kylki} + A_{kansi}$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{s_e}{\lambda_e} + \frac{1}{\alpha_s}}$$

λ lämmönjohtavuus ($\text{W/m}^2\text{°C}$)

s paksuus (m)

α_u absorptio- tai emissiokerroin ulkopinnassa 0,04 (m² K)/W

α_s absorptio- tai emissiokerroin sisäpinnassa 0,13 (m² K)/W

(Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981,III/4)(Finlex, Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C4)

Taulukko 1. Auringon säteilyn vaikutus ulkolämpötilaan lämpökuormaa laskettaessa (Hakala 2005, 35).

	Itä	Etelä	Länsi	Tasakatto
Tumma pintaväri	+5 K	+3 K	+5 K	+11 K
Harmaa	+4 K	+3 K	+4 K	+9 K
Vaalea pintaväri	+3 K	+2 K	+3 K	+5 K

2.2 Sisäinen lämpökuorma

Sisäinen lämpökuorma on varsin pieni, jos sitä verrataan ulkoiseen lämpökuorman suuruuteen. Yleisimmät sisäisen lämpökuorman tekijät ovat ilmanvaihto oven kautta ja koneellinen ilmastointi, valaistus, ihmiset sekä erilaiset sähkölaitteet.

Oven kautta tapahtuvaa ilmanvaihtoa arvioidaan ns. Bäckströmin kaavan avulla, joka antaa ilmanvaihtokertojen määrän:

$$n_i = 70/\sqrt{V}$$

n_i ilmanvaihto oviaukon kautta (krt/vrk)

V sisäilmantilavuus (m³)

Oven kautta tapahtuva ilmanvaihto Q_2 on tällöin

$$Q_2 = k_i * n_i * V * \rho_s * (h_u - h_s)$$

Q_2 *Oven kautta tapahtuvan ilmanvaihdon kuormitus (kWh/vrk)*

k_i *korjauskerroin (1-3)*

n_i *ilmanvaihtokertojen lukumäärä (krt/vrk)*

V *Osaston sisätilavuus (m³)*

ρ_s *osaston sisäilman tiheys (kg/m³)*

h_s *osaston sisäilman entalpia (kJ/kg)*

h_u *ilman entalpia osaston oven ulkopuolella (kJ/kg)(Hakala 2005, 35)*

Edelliseen kaavaan tarvittavat entalpia-arvot saadaan Hx-diagrammista (Mollier-diagrammi, liite 1). Oven kautta tapahtuvan ilmanvaihdon kuormaa voidaan pienentää aluksella erillisellä eteisellä, jolloin jäädytettävän ilman entalpiaero pienenee.

Koneellinen ilmanvaihto tapahtuu aluksella erillisen ilmastoinnin kautta. Laivan ilmastointi onkin merkittävä lämpökuormittaja. Ilmastoinnin aiheuttama lämpökuorma voidaan laskea melkein samalla kaavalla kuin oven kautta tapahtuva ilmanvaihto.

$$Q_3 = V/t * \rho_s * (h_s - h_u) * 3600 \text{ s/vrk}$$

Q_3 *koneellisen ilmanvaihdon lämpökuorma (kWh/vrk)*

V/t *tilavuusvirta (m³/s)*

ρ_s *sisäilman tiheys (kg/m³) (Hakala 2005, 36)*

Henkilöiden aiheuttamaa lämpökuormaa laskettaessa on arvioitava muutamia osaluokkia. Henkilön tuottama lämpökuorma määritellään työkuorman mukaan. Ihmisen muodostama kokonaislämpökuorma koostuu vapaasta lämmön luovutuksesta, n. 70

%, ja sidotusta lämmönluovutuksesta, 30 % (hengitys, hikoilu). Taulukko 2 pätee työskenneltäessä yli 20:n mutta alle 30:n asteen lämpötiloissa. Ihmisen lämpökuormitus kasvaa noin puolella, kun mennään alle -20 asteen lämpötiloihin. (Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981, V/17)

Taulukko 2. Ihmisen lämmönluovutus (Kylmäntarpeen laskenta 1981, V/17).

Rasitusaste	Kokonaislämmönluovutus
Ei fyysistä liikuntaa	116 W
Hiljaa istunta	102 W
Istunta, hiljeinen kävely	131 W
Kevyt työ	220 W
Keskiraskas työ	267 W
Raskas työ	426 W

Henkilöiden aiheuttama kokonaislämpökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$Q_4 = n_h * P_h * t_t$$

Q_4 henkilöiden aiheuttama lämpökuorma (kWh/vrk)

n_h henkilömäärä (kpl)

P_h lämmönluovutus (kW/hlö)

t_t työkentelyaika (h/vrk) (Hakala 2005, 37)

Valaistuksen aiheuttama lämpökuorma riippuu valaistuksen tyypistä ja voimakkuudesta. Valaisimen ottama sähköteho muuttuu melkein kokonaan lämmöksi.

Tyypillisin loisteputkilla toteutettu toimistovalistus tuottaa 17-25 W/m². Valaistuksen aiheuttama lämpökuorma voidaan laskea kaavalla:

$$Q_5 = A * P_v * t_v / 1000$$

Q_5 valaistuksen lämpökuorma (kWh/vrk)

A osaston pinta-ala

P_v valaistusteho (W/m²)

t_v valaistuksen käyttöaika (h/vrk) (Hakala 2005, 37)

Tehontarpeen määrittämisessä ei pystytä tarkkaan laskemaan kaikkea lämpökuormaa, jolloin syntyy epävarmuustekijöitä. Niitä syntyy esimerkiksi liian pieneksi arvioidun ilmanvaihdon tai työssä käytettävien tietokoneiden muodostamasta lämpökuormasta. Epävarmuustekijöitä pyritään poistamaan varmuuskertoimen avulla. Varmuuskertoimenä käytetään yleensä arvoja 1,1 – 1,3. (Hakala 2005, 38)

Kylmäkoneiston kokonaiskylmätehontarve lasketaan aiemmin laskettujen ulkoisten ja sisäisten kuormien sekä varmuuskertoimen avulla. Kun tämä jaetaan laiteiston käyttöajalla, saadaan osaston kylmätehontarve.

$$\Phi = Q_{\text{kok}} * k_k / t_k$$

Φ kylmätehontarve (kW)

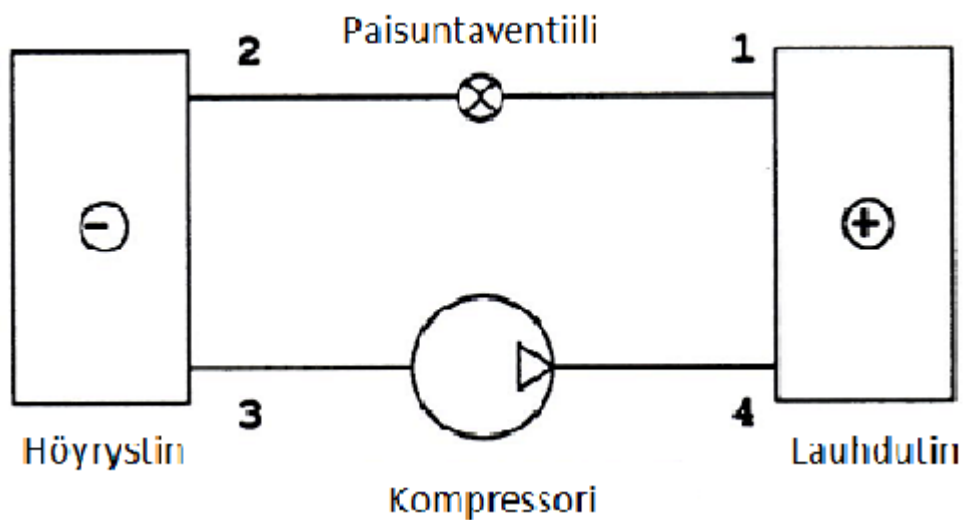
Q_{kok} osaston kokonaiskylmätehontarve (kWh/vrk)

k_k varmuuskerroin

t_k koneiston käyntiaika (h/vrk) (Hakala 2005, 38)

3 KYLMÄ- JA LÄMPÖPUMPPULAITOS JA SEN KOMPONENTIT

Voidaan sanoa, että kylmepumppulaitos on samalla lämpöpumppulaitos. Laitos on rakennettu ottamaan lämpöenergiaa matalilla lämpötiloilla, nostamaan sen korkeampaan lämpötilaan ja luovuttamaan sen. Käyttötarkoituksesta riippuu, käytetäänkö nimitystä kylmä- vai lämpöpumppulaitos.. Kylmälaitoksesta puhutaan, kun laitoksen tehtävänä on jäähdyttää tilaa, ja lämpöpumpusta silloin, kun laitos hyödyntää lauhtumislämpöä. Hyvä esimerkki kylmälaitoksesta on pakastin ja lämpölaitoksesta maalämpöpumppu. (Nydal 2002, 187.)



Kuva 3. Kylmänteon komponenttien sijoittuminen järjestelmässä. (Suomen Kylmäyhdistys ry. 1993)

3.1 Kompressori

Höyrystimen höyrystymistä ei voida pitää käynnissä, jollei samanaikaisesti imetä höyrystynyttä kylmäainetta pois. Tähän tehtävään tarvitaan kompressori, joka puristaa höyrystimessä muodostuneen kylmäainehöyryn ja nostaa sen lämpötilan niin korkeaan kyllästymislämpötilaan, että se pystyy luovuttamaan lämpöenergiaa ja lauhtumaan. Yleensä höyrystimen ja kompressorin välissä käytetään tulistinta, joka nostaa valmiiksi höyryn lämpötilaa. (Nydal 2002, 150.)

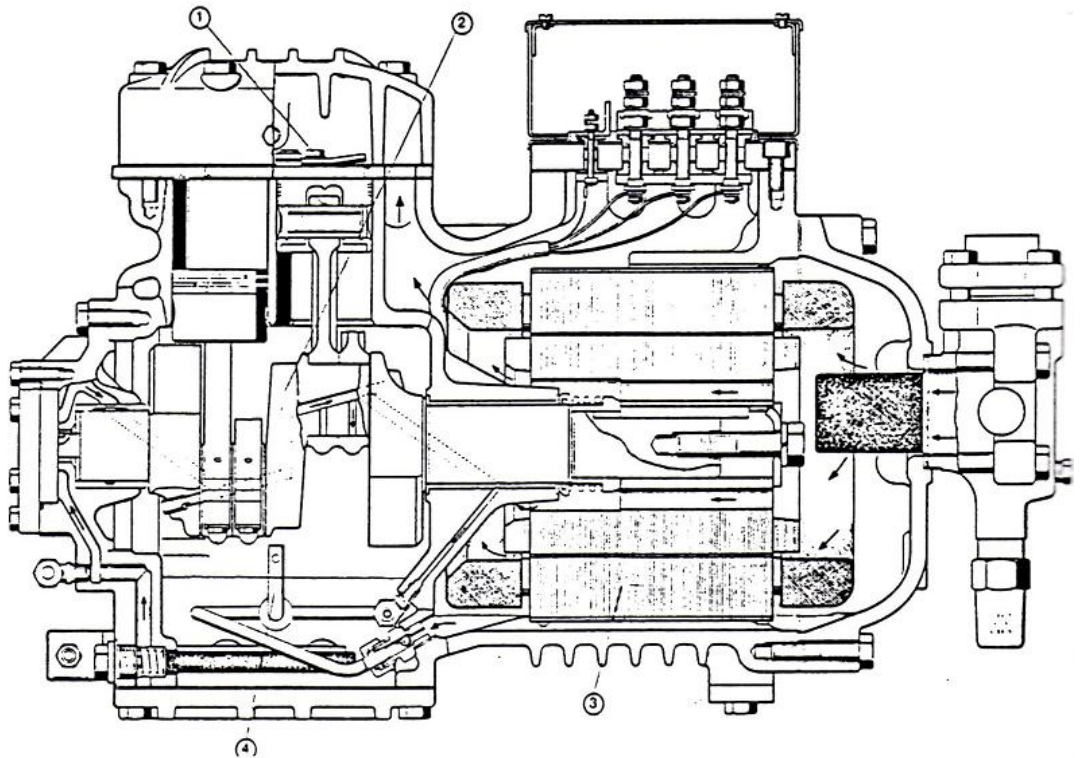
Kompressorin täytyy nostaa painetta ja lämpötilaeroa niin paljon, että voidaan taata riittävä lauhtuminen. Lämpötilaero saadaan vähentämällä lauhtumislämpötilasta

höyryn lämpötila ennen kompressoria. Lämpötilan ja paineen nousun rajoituksena ovat kylmäaineen ominaisuudet. Kylmäaineen lämpötilaa ei voida rajattomasti nostaa. (Nydal 2002, 150-151.)

Kompressorit jaetaan kahteen ryhmään. Nämä ryhmät eroavat puristustapahtumassa. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat ne kompressorit, joissa puristus tapahtuu mekaanisella kaasun puristuksella. Tähän kuuluvat mäntä-, ruuvi- ja lamellikompressorit. (Nydal 2002, 151.)

Toiseen ryhmään kuuluvat dynaamiset kompressorit, kuten turbokompressori. Paineen nousu tapahtuu siten, että kaasun nopeutta kasvatetaan, minkä jälkeen liike muutetaan yhdessä tai useammassa diffuusorissa paineeksi. (Nydal 2002, 151.)

Näistä mäntäkompressori on yleisin ja soveltuu kaiken kokoisiin kylmälaitoksiin. Mäntäkompressorit jaetaan vielä hermeettisiin, puolihermeettisiin, puoliavoimiin ja avoimiin. Avoimia mäntäkompressoreita on käytetty aikoinaan yleisesti laiva- ja teollisuuskäytössä. Nykypäivänä hermeettiset kompressorit ovat kehittyneet luotettavuuden osalta paljon. (Nydal 2002, 151)(Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, V/ 2-9.)



Kuva 4. Puolihermeettinen mäntäkompressor. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, V/ 5.)

3.2 Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiili on varsin tärkeä osa kylmälaitteistoja. Sillä on kaksi tehtävää: paisuntaventtiili säätelee kylmäaineen syöttöä niin, että se vastaa höyrystimen kuormitusta. Toiseksi se ylläpitää paine-eroa kylmälaitoksen matala- ja korkeapainepuolen välillä. (Nydal 2002, 107.)

Kylmäaineen virtausta voidaan ohjata monenlaisella systeemillä. Kaikki näistä toimivat samankaltaisesti, mutta säätötapa vaihtelee. Käytännöllisesti katsoen on olemassa seitsemän eri ohjaustapaa:

1. *Käsisäätöventtiilillä*
2. *Automaattisella paisuntaventtiilillä*
3. *Termostaattisella paisuntaventtiilillä*
4. *Kapillaariputkella*
5. *Sähköisellä (elektroninen) paisuntaventtiilillä*
6. *Pienpaine uimuriventtiilillä*

7. Suurpaine uimuriventtiilillä

(Nydal 2002, 107.)

Jokaisesta yllämainitusta ohjaustavasta on olemassa vielä lukuisia sovelluksia. Paisuntaventtiileistä paljon käytettyjä ovat kapillaariputki ja termostaattinen paisuntaventtiili. Näistä termostaattinen on yleisin. (Nydal 2002, 107-109.)

Termostaattisia paisuntaventtiilejä on eri kylmäaineille ja niillä on hyvät säätöominaisuudet. Termoelementti on täytetty kaasulla tai nesteellä, joka on usein samaa kuin laitoksessa oleva kylmäaine. Näin ollen se on suljettu järjestelmä. Termoelementtiin kuuluva tuntoelin kiinnitetään höyrystimen jälkeiseen imuputkeen. (Nydal 2002, 109.)

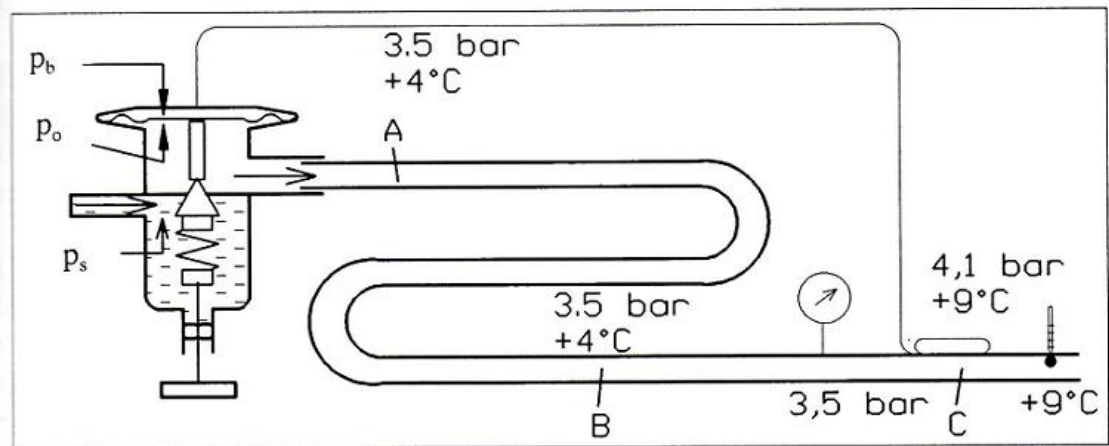
Venttiilin toimintaan vaikuttaa kolme eri suuretta (painetta, kuten kuvassa 5):

Venttiiliä pyrkii avaamaan tuntoelimen paine p_b , jonka määrää imuputken lämpötila siinä pisteessä, mihin tuntoelin on kiinnitetty. Tuntoelimen sisällä oleva aineen (neste)paine seuraa painelämpötilakäyrää.

Venttiiliä pyrkii sulkemaan höyrystymispaine p_0 ja jousipaine p_s

Niin kauan kun $p_b = p_0 + p_s$, on läpivirtaus venttiilin läpi vakio. (Nydal 2002, 107.)

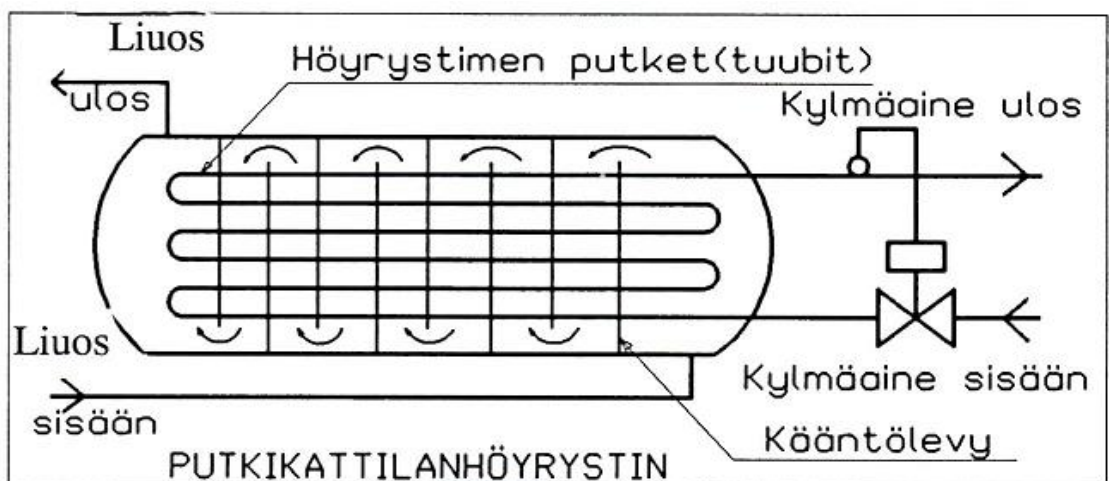
Jotta venttiilin toiminta olisi varmaa, tulee höyryn olla hieman tulistunutta, koska se vakauttaa venttiilin toimintaa. Venttiilin säätäminen haluttuun balanssiin on varsin haasteellista ja vaatii laajempaa tietämystä siitä, miten kukin toiminto vaikuttaa venttiilin ja höyrystimen toimintaan. Paisuntaventtiilillä pystytään siten vaikuttamaan koko kylmäntekoprosessiin. (Nydal 2002, 109-114.)



Kuva 5. Termostaatinen paisuntaventtiili. (Nydal 2002, 109.)

3.3 Höyrystin

Kun neste on ohittanut paisuntaventtiilin, se virtaa heikossa paineessa höyrystimeen. Höyrystin on se kylmälaitoksen osa, jossa lämpöenergia sidotaan kylmäaineeseen. Höyrystin on sijoitettava jäähdytettävään kohteeseen, tai siihen liitetään kylmäliuospiiri. Paineen alenemisen ansiosta nestemäinen kylmäaine alkaa höyrystyä sitoen lämpöenergiaa putkien seinämistä. Seurauksena on höyryputkien pinnan jäähtyminen, jolloin ympäristön lämpö siirtyy vastaavasti höyrystinputkien pintaan ja siitä kylmäaineeseen. Höyrystimen rakenne riippuu jäähdytystehosta, jäähdytettävästä aineesta ja käyttötarpeesta. Höyrystimen perusrakenne sisältää kylmäaineputkikierukan, johon on kiinnitetty lamelleja.



Kuva 6. Välillisessä jäähdytyksessä käytetty putkikattilahöyrystin. (Nydal 2002, 143)

3.4 Lauhdutin

Lauhduttimen tehtävänä on siirtää pois kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia, joka on tuotettu höyrystimessä ja puristuksessa. Lämpöenergia siirretään lauhduttimessa yleensä ilmaan tai veteen. (Nydal 2002, 146)

Lauhduttimeen virtaa kompressorista korkeapaineista kuumaa kylmäainekaasua, joka luovuttaa energiaa matalamman lämpötilan omaavaan aineeseen, esim. ilmaan tai veteen. Kaasu jäähdytetään ensiksi lauhtumislämpötilaansa. Lämmönluovutuksen jatkuessa höyry muuttua olomuotoaan höyrystä nesteeksi. Kylmälaitoksen toiminnalle on välttämätöntä, että saatavilla on riittävästi jäähdyttävää ainetta poistamaan lämpöä lauhduttimesta. Lauhtumislämpötilan nousu pienentää laitoksen kylmätehoa, koska lämpötilaero kasvaa ja samoin puristussuhde. Seurauksena on kuumakaasun lämpötilan nouseminen liian korkeaksi, joka aiheuttaa käyntiongelmia. (Nydal 2002; 60, 146-147)

4 JÄÄHDYTYKSEN- JA KYLMÄJÄRJESTELMÄT

Jäähdytys- ja kylmäjärjestelmät jaetaan yleensä kahteen luokkaan, suoraan tai välilliseen järjestelmään. Suorassa jäähdytysjärjestelmässä tavoitteena on mahdollisimman yksinkertainen lämmönsiirto suoraan kylmäaineeseen. Suorat järjestelmät jaetaan edelleen kuiva- tai märkähöyrysteisiin järjestelmiin. Välillisessä järjestelmässä lämpö siirretään ensin kylmäaineliuokseen, josta se höyrystimen kautta siirretään kylmäaineeseen. Myös lauhdutusjärjestelmä voi olla joko välillinen tai suora. Aluskäytössä suositaan välillisiä järjestelmiä, niin höyrystinpuolella kuin, lauhdutinpuolellakin. (Hakala 2005, 49)

Järjestelmää valittaessa otetaan huomioon käytössä oleva tila ja tilan sijainti jäähdytettävästä kohteesta. Usein tilan suunnittelijat jättävät kylmäkonehuoneen merkitykseltään toisarvoiseksi ja se voidaan viedä kauaskin kylmäkuormien painopisteestä. Tällöin voi syntyä ongelmia kylmäkoneiston rakentamisessa ja liian pitkissä putkitusmatkoissa. Järjestelmän hankinta- ja käyttökustannukset sekä järjestelmien edut ja haitat on syytä ottaa huomioon valintavaiheessa. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 2.)

4.1 Suorajäähdytysjärjestelmä

Suoraa jäähdytysjärjestelmää käytetään, kun halutaan edullinen järjestelmä. Tämä yleensä soveltuu sellaisiin kohteisiin, joissa ilman tai nesteen virtaus höyrystimen läpi on lähes vakio. Tällöin järjestelmän säädölle ei tarvitse asettaa suuria vaatimuksia. Suorajäähdytysjärjestelmä edellyttää lyhyitä kylmäaineputkien pituuksia.

Suoran jäähdytyksen etuja:

- koneiston teho on miltei heti saavutettavissa höyrystymisen jälkeen
- nesteputket ovat pienempiä
- nesteputkia ei tarvitse eristää
- helpompi höyrystimien sulatus
- välilliseen järjestelmään verrattuna höyrystymislämpötila on korkeampi
- parempi hyötysuhde.

Suoran jäähdytyksen haittapuolia:

- suurempi kylmäainetäytös
- suurempi mahdollisuus kylmäainevuotoon
- vaikeampi tehdä uudistuksia.

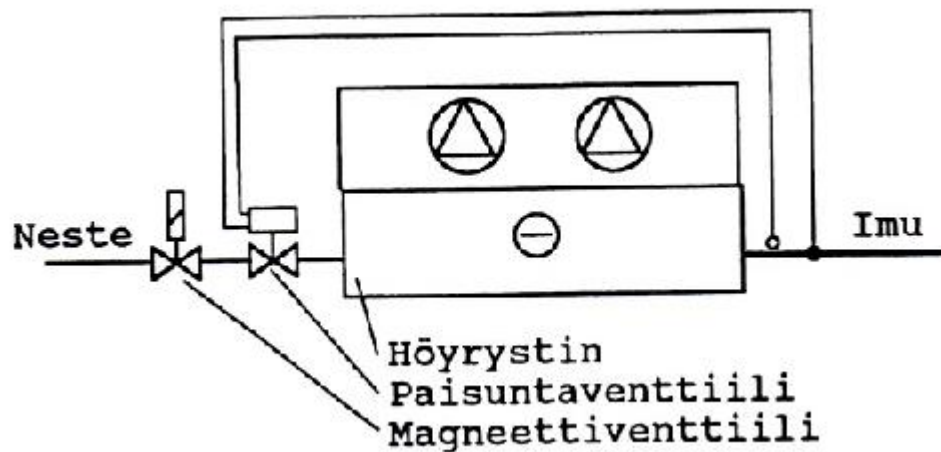
(Hakala 2005, 49.)

4.1.1 Kuivahöyrystys

Kuivahöyrystys tarkoittaa, että kaikki kylmäaine höyrystyy täydellisesti höyrystimessä. Tällöin höyrystimestä lähtevä kylmäaine on osittain tulistunutta. Höyrystymislämpötila on riippuvainen kylmäaineen ominaisuuksista. Kylmäaineen syöttöä höyrystimeen säädetään termostaattisen paisuntaventtiilin avulla. Venttiiliä ohjataan tulistuksen mukaan siten, että tulistuksen pienentyessä venttiili sulkeutuu. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 7.)

Tämän järjestelmän etuja on sen edullisuus ja yksinkertaisuus. Samoin se, että kompressorin tarvitsema öljy kulkeutuu kylmäaineen mukana takaisin ilman erikoisjärjestelyjä. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 7.)

Paisuntaventtiilin haittapuolena on sen rajoittunut toiminta-alue ja venttiilin reagoitinopeus eri kuormitusvaihteluissa. Lisäksi venttiili on valittava huolellisesti, ettei se ole liian suuri osakuormilla tai liian pieni ajettaessa suuria kuormituksia. Kyseiset tilanteet voivat johtaa höyrystimen tulvimiseen, joka taas aiheuttaa nesteiskuja kompressoriin. Tämän estämiseksi voidaan käyttää erillisiä pisaranerottimia kompressorin imuputkessa. Uudet elektroniset paisuntaventtiilit vähentävät tätä haittaa. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 7.)



Kuva 7. Kuivahöyrystinpatteri (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 8).

4.1.2 Märkähöyrystin

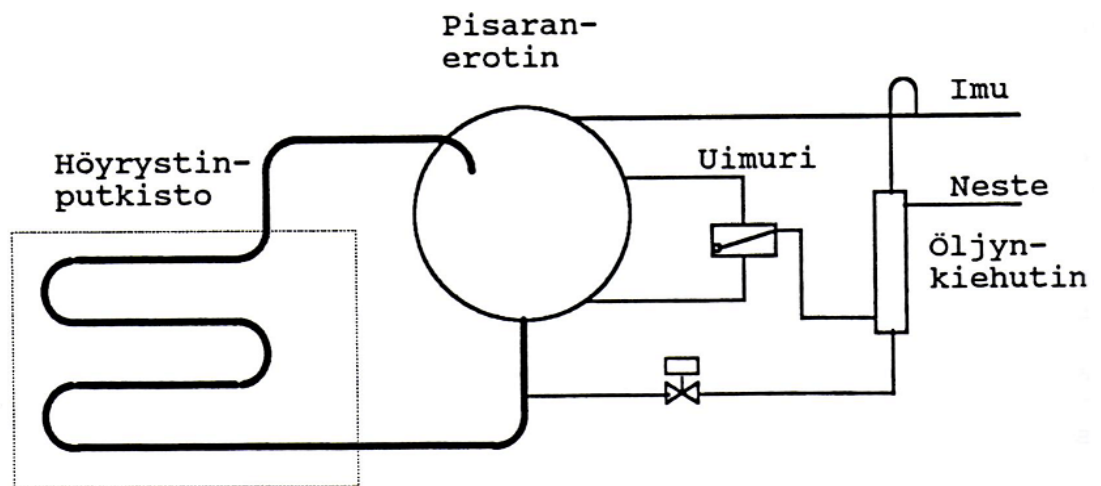
Märkähöyrystin eroaa varsin paljon kuivahöyrystimestä siinä, että koko höyrystin putkisto on täynnä kylmäainetta. Kuvassa 8 on tyypillinen märkähöyrystin apulaitteinen. Kylmäaineen pintaa pisaranerottimessa säädetään yleensä korkeapaine- tai matalapaineuimuriventtiilillä. Kylmäaineenkierto tapahtuu painovoimaisesti. Pisaranerottimesta tulee kylmäaine nesteenä höyrystimeen, jossa kylmäaine höyrystyy osittain. Kylmäainekaasun ja -nesteen seos tulee takaisin pisaranerottimeen, josta neste jatkaa uudelle kierrokselle höyrystimeen. Pisaraerottimen yläosasta kompressori imee kuivaa höyryä. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 8-9.)

Kylmäaineen nopeus pisaranerottimessa on niin pieni, että öljy ei kulje kylmäainekaasun mukana. Sen takia järjestelmä joudutaan varustamaan erillisellä laitteella, jotta öljy saadaan kompressorin imuputkessa kulkevan

kylmäainekaasuvirtaan. Tätä laitetta kutsutaan öljynkiehuttimeksi. (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 9.)

Märkähöyrystintä käytetään sellaisissa kohteissa. joissa

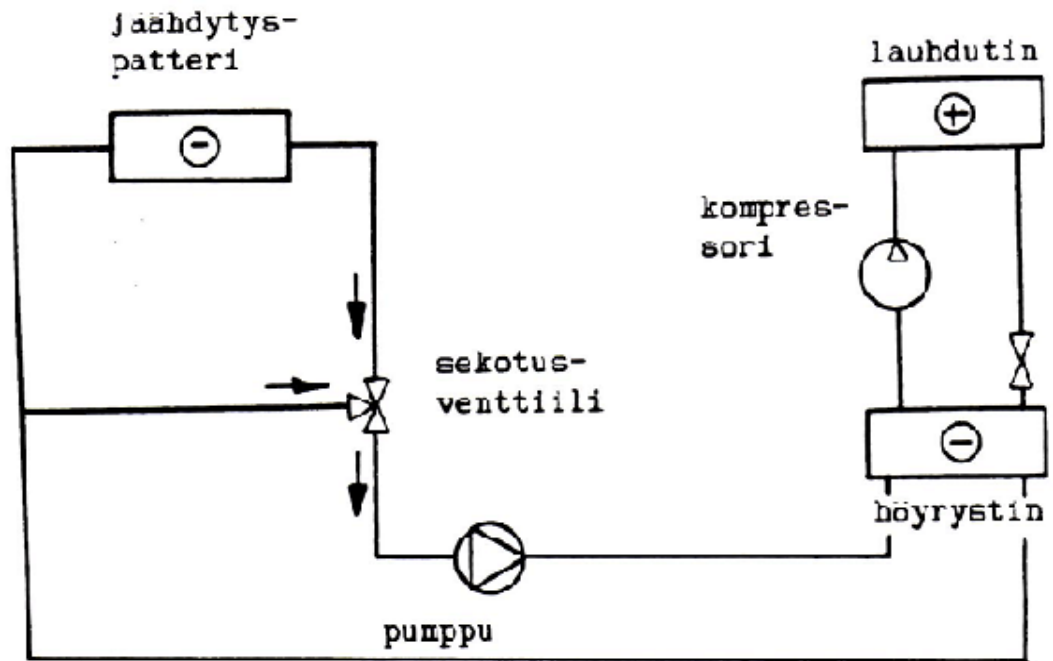
- on pienet lämpötilaerot
- tehonvaihtelut höyrystimessä ovat ajoittain suuria
- höyrystimen rakenteesta johtuen ei voida käyttää paisuntaventtiiliä (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 9.)



Kuva 8. Märkähöyrystinpatteri (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, III/ 8).

4.2 Välillinen jäähdytys

Välillisellä jäähdytysjärjestelmällä on paljon yhteistä suoraan jäähdytykseen verrattuna. Järjestelmään lisätään liuos- ja lauhdutuspiiri.



Kuva 9, Välillisen jäähdytyksen kylmäaine ja liuospiiri (Suomen Kylmäyhdistys ry 1993, XI/ 2).

Välillistä järjestelmää käytetään, kun

- halutaan tarkka säätö
- halutaan pieni kylmäainetäyttö
- halutaan minimoida kylmäaineen vuotoriski
- kylmäainetta sisältäviä laitteita ei voida asentaa työ- tai tuotantotiloihin
- halutaan tasata kuormitushuippuja
- jäähdytettävän ilman tai nesteen virtaus vaihtelee
- laitteiden väliset putkimatkat ovat pitkiä
- jäähdytyskohteita on useita
- varaudutaan laajennuksiin
- käytetään vapaajäähdytystä
- hyväksytään usein kalliimpi hankintahinta
- hyväksytään mahdollisesti suurempi energiankulutus.

(Hakala 2005, 49)

Välillistä lauhdutusta käytetään, kun

- *kompressorin ja lauhduttimen välimatka olisi liian pitkä suoralle järjestelmälle*
- *halutaan pienempi kylmäainetäyttö*
- *halutaan hyödyntää lauhdelämpöä joustavasti*
- *halutaan hyödyntää vapaajäähdytystä*
- *käytetään vedenjäähdytyskoneistoa, jossa on märkähöyrystin.*
- Jäähdyttävää ainetta on rajattomasti
- Laiva käytössä

(Hakala 2005, 50)

5 KYLMÄAINEEN VALINTA

Kylmäaineissa on viime vuosina tapahtunut suuria muutoksia uusien määräyksien vuoksi. Useimmat vanhat kylmäaineet olivat joko osittain tai täysin halogenoidut. Halogenoidut kylmäaineet aiheuttavat ilmaan päästyään vaurioita ilmakehän otsonikerrokseen. Kylmäaineet lajitellaan pääasiassa neljään luokkaan aineen kemiallisen koostumuksen mukaan. (Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008)

CFC-aineet (ChloroFluoroCarbons) eli täysin halogenoidut aineet sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä. Nimenomaan kloori aiheuttaa ilmakehän otsonikerroksen tuhoa stratosfäärissä. CFC-aineiden valmistus- ja maahantuontikielto on ollut Euroopassa voimassa vuoden 1995 alusta lähtien. CFC-aineita ovat esimerkiksi R11, R12, R502 ja R13B1. (Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008) (Hakala 2005, 23)

HCFC-aineet (Hydro-ChloroFluoroCarbons) ovat myös otsonikerrokselle haitallisia mutta haitallisuuskerroin on huomattavasti pienempi verrattuna CFC-aineisiin. Nämä aineet tulivat lainsäädännön mukaan kielletyiksi vuoden 2010 alusta. Laitteistoja, joissa kyseistä kylmäainetta on, saa käyttää vuoteen 2015 asti. HCFC-aineita ovat esimerkiksi R22, R401A, R402A ja B. (Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008) (Hakala 2005, 23)

HFC-aineet (HydroFluoroCarbon) ovat täysin vapaita kloorista. Aineet ovat otsonikerrokselle täysin vaarattomia. Haittapuolena on, että ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. HFC-aineet tulee ottaa talteen ja ne on toimitettava

ongelmajätteenä eteenpäin. HFC-aineita ovat esimerkiksi R134a, R404A, R407C, R410A ja R507. (Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008) (Hakala 2005, 23)

Halogeenittomat aineet ovat luonnonmukaisia kylmäaineita, joissa otsonikerroksen haitallisuus ja kasvihuoneilmiön vaikutus ovat 0. Nämä kaasut ovat käytännössä hiilivety-yhdisteitä, kuten isobutaani R600a, propaani, ammoniakki tai hiilidioksidi. (Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008) (Hakala 2005, 23)

Uutta laitosta rakennettaessa tulee suunnitella käytettävä kylmäaine. Erinäisistä syistä markkinoille on tullut paljon uusia yhdisteitä. Näistä aineista täytyisi osata valita käyttökohteeseen parhaiten sopiva aine. Kylmäaineen valintaan vaikuttavia tekijöitä on runsaasti ja usein joutuu tekemään kompromisseja. Ideaaliselta kylmäaineelta vaaditaan moninaisia ominaisuuksia:

- suuri höyrystymislämpö, jolloin kiertävä massavirta on pieni
- suuri tilavuustuotto, vaikuttaa kompressorin kokoon
- kohtuullisen pieni höyrystymispaine normaaleissa lauhtumislämpötiloissa
- pieni painesuhde edesauttaa ettei aine tulistu puristuksessa
- hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet höyrystymisessä ja lauhtumisessa
- pieni veden liukoisuus
- hyvä sekoituvuus voiteluöljyn kanssa
- palamattomuus
- myrkyttömyys

(Hakala 2005, 24-26) (Aittomäki 1992, 1-4)

6 KYLMÄKONEISTON MITOITUS

Kylmäkoneisto mitoitetaan kylmäntarpeen laskennan perusteella. Laskennasta saadun tehon tarpeen perusteella voidaan tehdä esivalintoja. Esivalinnat eivät välttämättä ole lopullisia, koska laitteiston suunnittelussa joudutaan tekemään kompromisseja. Laitteiston oikeaoppinen mitoittaminen on varsin tarkkaa ja haasteellista työtä. Tällaisen laitteiston suunnitteleminen vaatii alan koulutusta ja ammattitaitoa.

6.1 Nestejäähdytteisen höyrystimen valinta

Nestehöyrystiminä käytetään yleensä moniputki-, levy- tai koaksiaalihöyrystimiä (Hakala 2005, 87). Näistä yleisimmin käytetään moniputki- tai levyhöyrystintä. Mitoitukseen vaikuttaa kylmäaine, höyrystymislämpötila, kylmäteho sekä tulevan ja lähtevän nesteen lämpötila. Ilmastoinnin vedenjäähdytyksessä käytetään yleensä lähtevän veden lämpötiloja +6... +8 °C, ja lämpötilaeroa käytetään 5 - 10 K. Veden lämpötilan suurempi lämpötilaero alentaa jäähdytysveden virtaamaa, putkisto ja pumppauskustannuksia. (Hakala 2005, 87.)

Nestetilavuus levylämmönvaihtimissa on pienempi verrattuna moniputkilämmönvaihtimiin. Levylämmönvaihtimissa on suurempi lämmön siirtyminen tehokkaampaa kuin moniputkivaihtimissa, tällöin vaihtimen toiminta on paljon nopeampaa. Levylämmönvaihtimien huonona puolena on suurempi jäätymisriski, mikäli kylmäaineen höyrystymislämpötila laskee alle jäätympisteen. Kun käytetään kylmäainetta, jolla on suuri liukuma, esim. R407-C, kylmäaineen höyrystymislämpötila laskee aina käynnistymisvaiheessa alle jäätympisteen, mikäli pyritään lähtevän veden lämpötilaan +7 °C. Tällöin on mitoitettava vesipuolelle riittävän suuri painehäviö, jolloin virtaama on tasaisempaa vaihtimessa. (Hakala 2005, 87)

6.2 Kompressorin valinta

Valittaessa kylmälaitokseen sopivaa kompressoria on otettava huomioon lukuisia tekijöitä. Suurimmat vaikuttavat tekijät määräytyvät kylmäaineen, kylmätehon sekä kompressorityypin mukaan. Höyrystymis- ja lauhtumislämpötila vaikuttavat siihen, kuinka monessa asteessa puristustyö tapahtuu. Esimerkiksi R407-C tarvitsee vain yksiasteisen kompressorin. (Hakala 2005, 67)

Yleensä kompressori valitaan valmistajien valintaohjelmilla, tehotaulukoiden tai käyrästöjen mukaan. Kompressorityyppiin, eli onko kompressori avoin vai hermeettinen, vaikuttavat teho ja jäähdytystehon tarve. Avointa kompressoria käytetään suuritehoisissa laitoksissa. Avoimen etuna on helppo kierrosluvun säätö esim. kiilahihnakäytöllä. Hermeettisiä eli täysin suljettuja käytetään, kun sähköteho on n. 50 W - 50 kW. Hermeettisen etuna on hyvä suoja ulkoisilta vaikutuksilta; hiljainen

käynti ja tehokas jäähditys. Hermeettisen etuna on myös varmatoimisuus ja pitkät huoltovälit. (Hakala 2005, 67.) (Aittomäki 1992, 153 - 156.)

Kompressorin valinnassa on otettava huomioon höyrystyslämpötila ja lauhtumislämpötila. Yleensä kylmäaine tulistuu höyrystimessä noin 5 - 10 K ja höyrystimen jälkeen imuputkessa noin 1 - 20 K (määrä vaihtelee riippuen imuputken pituudesta, eristyksestä sekä höyrystyslämpötilasta). Mikäli imuputkeen on lisätty lisätulistin, se on otettava huomioon mitoituksessa. Höyrystyslämpötilasta, tulistusasteesta ja imuputkessa tapahtuvasta tulistumisesta on vähennettävä imuputken ja sen varusteiden aiheuttama painehäviö. Toisaalta lauhtumislämpötilaan on lisättävä kompressorin ja lauhduttimen välissä olevan putken ja sen varusteiden aiheuttama painehäviö. (Hakala 2005, 67.)

Esimerkiksi

Höyrystyslämpötila höyrystimellä -8 °C

Lauhtumislämpötila lauhduttimella +40 °C

Jos imu- ja painetuksen painehäviö on 1 K, kompressori valitaan silloin olosuhteissa -9 °C / +41 °C. (Hakala 2005, 67.)

Käytettäessä kylmäaineita, joilla on liukuma, pitää päättää, käytetäänkö mitoituksessa höyrystymis- ja lauhtumislämpötiloina keskilämpötilaa vai dew point-lämpötilaa. Pääasia on, että käytetään samaa lämpötilaa lämmönvaihtimien mitoituksessa. Kompressorin käyttömoottori tulee mitoittaa maksimaalisten höyrystymis- ja lauhtumislämpötilojen mukaan. (Hakala 2005, 68.)

6.3 Lauhduttimen mitoitus

Lauhduttimen valintaan vaikuttavia tekijöitä on useita. Yleensä tärkein tekijä on käytettävissä oleva lauhduttava aine ja sen määrä. Laivalla tämä ei ole ongelma, koska melkein ainoa tapa on lauhduttaa merivedellä. Koska kyseessä on rajaton ja melkein vakio lauhdeveden lämpötila, on lauhduttimen mitoitus helpompaa. Merkittävimäksi

tekijäksi valinnassa muodostuu kylmäaine ja sen lauhtumislämpötila. (Hakala 2005, 77.)

Lauhdutustehon tarpeen laskenta on varsin yksinkertaista:

$$Q_l = Q_j + Q_k$$

Q_l *lauhdutusteho*

Q_j *kompressorin jäähdytysteho*

Q_k *kompressorin sähkönottoteho*

(Hakala 2005, 71)

Koska kyseessä on rajattomasti saatava lauhdutusaine, lauhtevien lämpötilaerona on hyvä pitää 5 - 8 K. Merivesipuolen painehäviön tulisi olla välillä 10 - 50 kPa. Jos painehäviö on alle 10 kPa, saattaa virtaus muuttua laminaariseksi, jolloin lämmönsiirtokyky heikkenee. (Hakala 2005, 77.)

6.4 Putkiston mitoitus

Putkiston mitoitus on tärkeää, jotta laitos toimii moitteettomasti kaikissa mahdollisissa tilanteissa. Putkiston painehäviö ilmoitetaan sitä vastaavan lämpötilan muutoksena kylmäaineen kyllästymisalueella. Putkistossa tapahtuva painehäviö johtuu kitkavaikutuksesta putkistossa, sen osissa ja varusteissa. Mitoituksen tarkoituksena on taata paras mahdollinen ratkaisu taloudellisuuden, painehäviöiden ja öljyn palautuksen kannalta. Kuten taulukosta 3 voidaan hyvin havaita, kohtalaisen pienillä eroilla saadaan aikaan huomattava jäähdytystehon pudotus, joka taas johtaa energiankulutuksen kasvuun. Toisaalta taas liiallinen putkikoon kasvattaminen johtaa putkiston, sen varusteiden ja eristämisen hankinta- ja asentamishintaa. Putkikoon pienentäminen pienentää hankintakustannuksia mutta aiheuttaa painehäviöiden kasvua mikä taas johtaa taulukon 3 mukaisiin tehon menetyksiin ja energian kulutukseen. (Hakala 2005, 51-53)

Taulukko 3. *Painehäviön vaikutus laitoksen jäähdytystehoon ja energian kulutukseen, kun kylmäaineena R404A ja käyntiolosuhteina -35 °C / +40 °C. (Hakala 2005, 51)*

Painehäviö	Jäähdytysteho	Energian kulutus
Imuputki		
0 °C	100 %	100 %
1 °C	95,7 %	102,8 %
2 °C	91,5 %	105,7 %
3 °C	87,4 %	108,7 %
Paineputki		
0 °C	100 %	100 %
1 °C	98,8 %	102,5 %
2 °C	97,6 %	105,1 %
3 °C	96,4 %	107,7 %

Putkisto jaetaan kuuteen luokkaan:

- *paineputki* *kompressorilta lauhduttimelle*
- *lauhdeputki* *lauhduttimelta nestevaraajalle*
- *nesteputki* *nestevaraajalta höyrystimelle*
- *imuputki* *höyrystimeltä kompressorille*
- *ohjausputket*
- *öljyputket*

(Hakala 2005, 51)

Imuputki

Imuputkessa vaikuttava virtaus on yleensä 10 - 25 m/s. Tämä vaihtelee kylmäaineen, höyrystymis- ja lauhtumislämpötilan sekä jäähdytystehon mukaan. Imuputkessa tapahtuvan painehäviön vaikutuksesta imuhöyryn ominaistilavuus kasvaa, mikä pienentää massavirtaa ja vaikuttaa suoraan kylmätehoon. Puristuksen loppulämpötila kohoaa johtuen kompressorin kasvaneesta painesuhteesta. Luvussa 6.2 todettiin, että mitoittamalla kompressorin valmiiksi imuputken painehäviö, jolloin imuputkella on vara hukata mitoitettu painehäviö. (Hakala 2005, 51)

Paineputki

Paineputkessa virtausnopeus pienenee n. 10 m/s verrattuna imuputkeen. Paineputkessa tapahtuva painehäviö näkyy kompressorin puristussuhteessa, joka nousee. Puristussuhteen nousu aiheuttaa puristuksen loppulämpötilan nousua, jolloin kompressorin jäähdytysteho pienenee taulukon 3 mukaisesti. Niin kuin imuputkenkin kohdalla kompressorin mitoitusvaiheessa lisätään lauhtumislämpötilaa painehäviön verran, jolloin paineputki voi hukata mitoitettun painehäviön. (Hakala 2005, 51-52.)

Lauhde ja nesteputket

Lauhduttimelta lähtevä lauhdeputki varaajalle mitoitetaan siten että lauhtunut kylmäaine saataisiin staattisen korkeuseron avulla varaajalle. Lauhdeputki mitoitetaan yleensä yhtä putkikokoa pienemmäksi kuin paineputki. (Hakala 2005, 52.)

Nesteputkessa tapahtuva painehäviö pienentää käytettävissä olevaa paine-eroa paisuntaventtiilille. Vaarana painehäviön liian suurella kasvattamisella on, että kylmäaine saattaa alkaa höyrystyä ennen paisuntaventtiiliä. Paisuntaventtiilille tuleva kylmäaine sisältää kaasukuplia, jolloin kylmäainenesteen ominaistilavuus kasvaa voimakkaasti. Näin paisuntaventtiilin teho ei enää riitä nesteen ja kaasun seokselle. Nestelinjan pystynousussa nestepatsas aiheuttaa staattisen painehäviön. Jos tämä painehäviö sekä nesteputken ja sen varusteiden aiheuttama painehäviö yhteensä on alijäähdytystä suurempi, se saattaa aiheuttaa nesteen höyrystymistä. Tämän voi laskea kaavalla:

$$\Delta p_{kok} = \Delta p_p + \rho \cdot g \cdot h \left(\frac{N}{m^2} = Pa \right)$$

missä

Δp_{kok} kokonaispainehäviö

Δp_p nesteputken ja sen varusteiden aiheuttama häviö

ρ kylmäainenesteen tiheys (kg/m^3)

g maan vetovoiman kiihtyvyys = $9,81 m/s^2$

h putkinousu (m)

Taulukossa 4 on laskettu eri kylmäaineille tarvittava nesteen alijäähdytys. (Hakala 2005, 52)

Taulukko 4. Nousevan nestepatsaan vaatima alijäähdytys K/m. (Hakala 2005, 52)

Nousevan nesteputken nestepatsaan vaatima alijäähdytys K/m

	Lauhtumislämpötila (°C)				
	+20	+30	+40	+50	+60
R134a	0,70	0,53	0,42	0,33	0,26
R404A	0,36	0,28	0,22	0,17	0,12
R407C	0,45	0,34	0,27	0,21	0,16
R410A	0,27	0,21	0,16	0,13	0,10

Ekvivalentti putkipituus

Kaikissa putkistoissa on erinäinen määrä tietyn muotoisia kaaria sekä erilaisia venttiilejä, kuivaimia ja takaiskuventtiilejä. Putkille lasketaan ekvivalentti putkipituus, jotta kaaret ja venttiilit tulee huomioida putkien pituuksissa. Taulukossa 5 on T-haarojen ja kaarien ekvivalentit putkipituudet. (Hakala 2005, 52.)

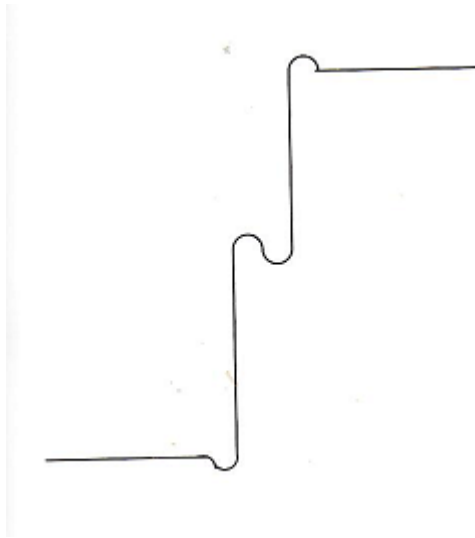
Taulukko 5. Ekvivalentti putkipituus Cu-osille. (Hakala 2005, 52)

Ekvivalentti putkipituus kaarille

Cu-putki Koko (mm)	Kaari			T-haara	
	45°	90°	180°	Jako	Yhdistys
6	0,1	0,10		0,3	0,7
8	0,1	0,11		0,45	1,1
10	0,15	0,15	0,25	0,6	1,45
12	0,15	0,20	0,3	0,8	1,8
15	0,20	0,25	0,4	1,0	2,4
18	0,20	0,3	0,5	1,3	2,9
22	0,25	0,4	0,6	1,6	3,6
28	0,3	0,5	0,7	2,0	4,5
35	0,4	0,6	0,8	2,5	5,8
42	0,6	0,7	1,0	3,0	7,0
54	0,8	0,9	1,4	3,9	9,0
64	0,8	1,1	1,8	4,7	10,8
76	0,9	1,3	2,2	5,6	13,0
89	1,1	1,6	2,6	7,0	15,3
108	1,3	1,9	3,2	8,1	18,7

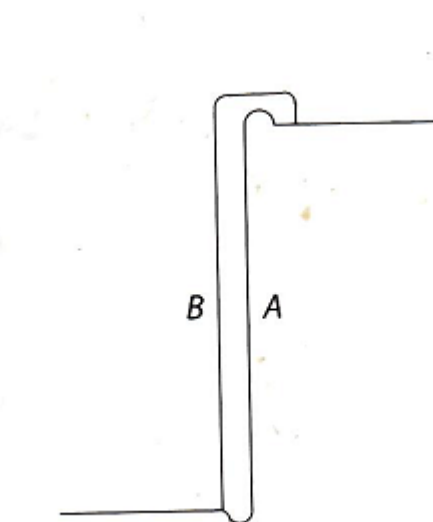
Öljynpalautuksen huomioiminen putkistomitoituksessa

Putkistoa mitoitettaessa on huomioitava kompressorin voiteluöljyn palautus. Suurimmat laitokset, joiden höyrystymislämpö on alle 0 °C, varustetaan usein öljynerottimilla. Tästä huolimatta jonkin verran öljyä (0,5 - 3 %) pääsee kulkeutumaan putkistoon. Putkistoon päässyt öljy kiertää putkiston läpi ja palaa imuputkea myöten takaisin kompressorille. Yleensä kylmäaine ja öljy liukenevat vain osittain toisiinsa, joten kaasulla pitää olla riittävä virtausnopeus, jotta öljy kulkeutuisi kaasun mukana putkistossa. Öljyn kulkemista helpotetaan rakentamalla putkistot edistämään öljyn kulkua. Lisäksi putkistoon tehdään öljymutkia (kuva 10) ennen nousuja. (Hakala 2005, 53.)



Kuva 10, Putkinousu varustettuna öljymutkillilla (Hakala 2005, 141).

Mikäli kompressorissa käytetään osatehoja, tulee varmistaa, että miniminopeudet saavutetaan. Virtausnopeutta voidaan nostaa pienentämällä putkikokoa, mutta se taas nostaa painehäviötä suuremmaksi. Toisaalta ratkaisuna voi olla myös kaksoisputkinousun rakentaminen (kuva 11) (Hakala 2005, 53.)



Kuva 11. Kaksoisputkinousu (Hakala 2005, 141).

Putkiston painehäviön määrittely

Laitosta rakennettaessa määritellään jokaisen putkiston painehäviöt. Eri kylmäaineille on valmiiksi laadittu putkistomitoitusta helpottavia taulukoita ja käyrästöjä. Niitä

laadittaessa käytetään yleensä taloudellisuusvertailuun perustuvina painehäviöinä taulukon 6 mukaisia arvoja. (Hakala 2005, 53)

Taulukko 6. Taloudellisuusvertailuun perustuva painehäviö (Hakala 2005, 53).

imuputki	1	K / 25 m
paineputki	0,5 ... 1	K / 25 m
lauhdeputki	0,5	K / 25 m tai nopeus 0,5 m/s
nesteputki	0,5	K / 25 m.

Putkiston mitoitustaulukot

Liitteen 2 mukaiset putkimitoitustaulukot on laadittu putkiston mitoitusohjelmalla, Solvay Refrigerantsin Solkane Pipe sizing 1,0 jonka perustana on Ashrae-handbook Refrigeration 1998, Chapter 2. Lisäksi on laadittu öljynpalautustaulukoita, joista voi tarkistaa minimitehot, joilla varmistetaan öljyn kulkeutuminen imu- ja paineputkien nousuissa. (Hakala 2005, 53.)

Mikäli halutaan laskea mitoitustehoja eri painehäviöillä ja ekvivalenttisilla putkipituuksilla kuin liitteen 2 taulukoissa käytetyillä arvoilla, on olemassa hyvin yksinkertaisia kaavoja:

$$Q = Q_{taul} \left(\frac{L_{taul} \cdot \Delta T_{tod}}{L_{tod} \cdot \Delta T_{taul}} \right)^{0,55}$$

Todellinen painehäviö saadaan laskettua, kun tunnetaan todellinen ekvivalenttinen putkipituus ja jäähdytysteho, kaavalla:

$$\Delta T_{tod} = \Delta T_{taul} \left(\frac{L_{taul}}{L_{tod}} \right) \left(\frac{Q_{tod}}{Q_{taul}} \right)^{1,8}$$

jossa

Q_{tod} *todellinen jäähdytysteho*

Q_{taul} *taulukossa oleva jäähdytysteho*

ΔT_{tod}	<i>todellinen painehäviö</i>
ΔT_{taul}	<i>taulukon mitoitusperuste painehäviö</i>
L_{tod}	<i>todellinen ekvivalentti putkipituus</i>
L_{taul}	taulukon mitoitusperuste ekvivalentti putkipituus (Hakala 2005, 53)

6.5 Liuospumpun ja putkiston mitoitus

Putkistoa rakennettaessa on ensin valittava käytettävä putkimateriaali. Yleensä käytetään kupariputkia niiden hyvän korroosionsietokyvyn takia. Kupari on myös helppo rakennusmateriaali ja käyttöikänsä pitkäikäinen. Kupariputket suljetussa jäähdytyskierrossa antavat hyvät edellytykset käyttää korkeitakin virtausnopeksia aiheuttamatta putkistoon eroosiota. Mitoituskriteereinä ei näin ollen ole virtausnopeudet vaan verkoston painehäviöt ja pumppauskustannukset. (Scandinavian Copper Development Association)

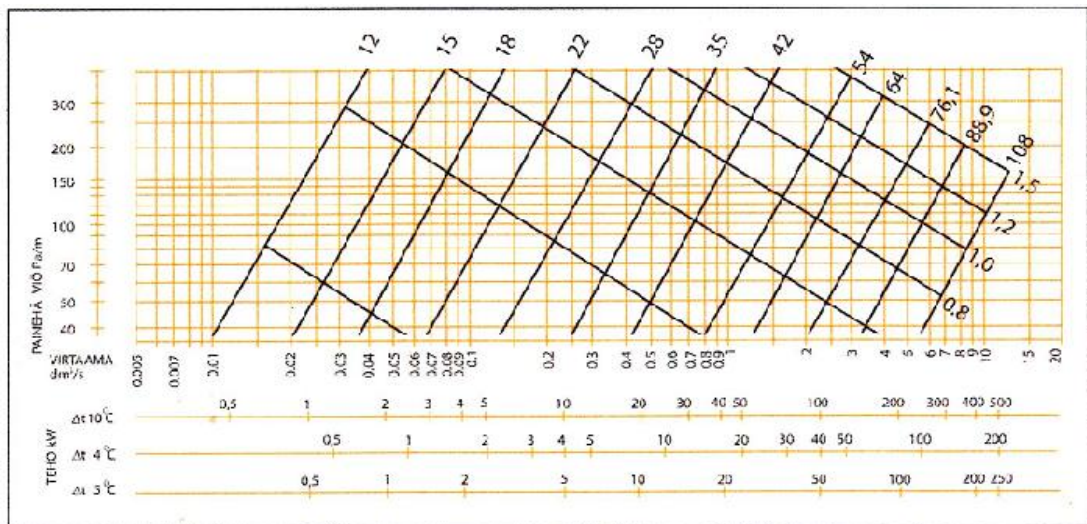
Taulukosta 7 voidaan katsoa kulloinkin tarvittava putkikoko, kun tiedetään, kuinka paljon energiaa putken kautta on tarkoitus kuljettaa ja millä lämpötilaerolla.

Taulukko 7 Kuparisten jäähdytysputkistojen mitoitusaulukko putkiston alustavaan mitoitukseen. (Scandinavian Copper Development Association)

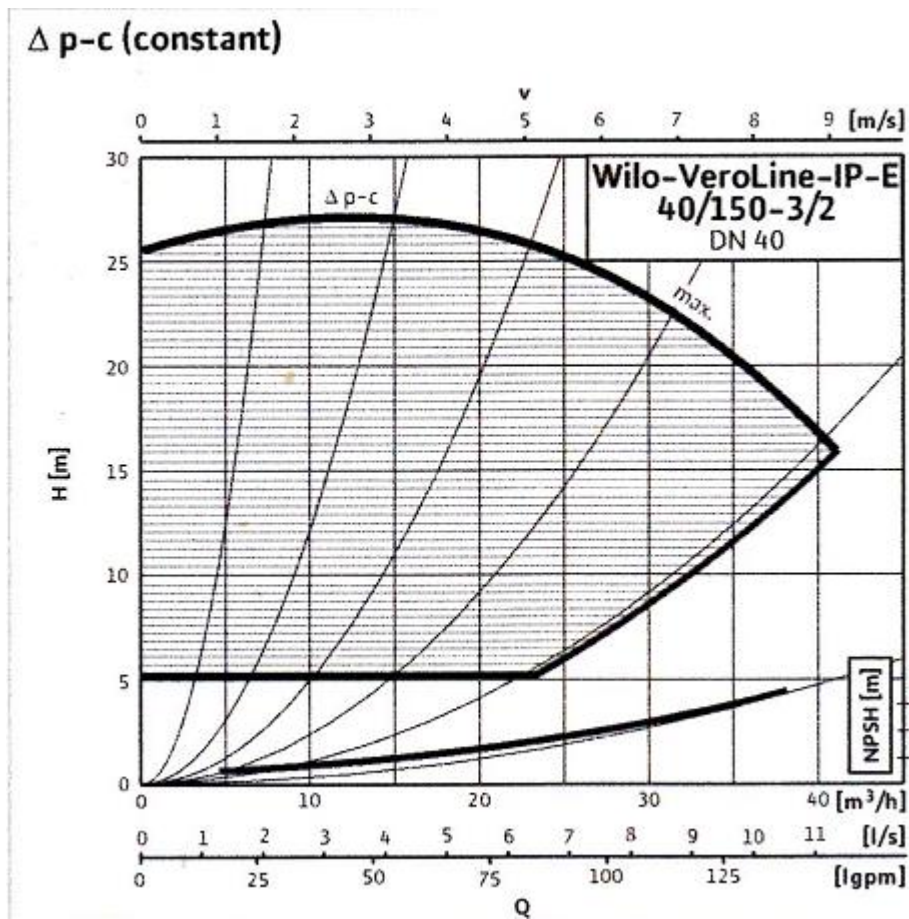
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	Ulkohalkaisija, mm									
	12x1.0	15x1.0	18x1.0	22x1.0	28x1.2	35x1.5	42x1.5	54x1.50	64x2	76,1x2
4	320	620	1 170	2 200	4 200	7 440	12 200	25 000	38 000	60 000
5	400	790	1 470	2 750	5 230	9 300	15 300	31 300	48 000	75 000
6	470	940	1 760	3 300	5 300	11 100	18 300	37 600	57 000	90 000
10	790	1 570	2 930	5 500	10 500	18 600	30 600	62 700	96 000	150 000
15	1180	2 350	4 400	8 200	15 700	27 900	45 900	94 000	140 000	220 000
$v=m/s$	0.23	0.30	0.35	0.40	0.45	0.54	0,62	0.78	0.81	0.94

Taulukossa 8 on esitetty painehäviödiagrammi, josta saadaan lasketuksi painehäviöt valitulla putkikoolla.

Taulukko 8. Painehäviödiagrammi. (Scandinavian Copper Development Association)



Koska kyseessä on kylmäliuosputkisto, joudutaan miettimään putkiston eristämistä kosteuden tiivistymisen takia. Kosteutta tiivistyy putken pintaan, koska putkessa virtaa yleensä ympäröivää tilaa kylmempää ilmaa. Kosteus alkaa tiivistyä, kun putken lämpötila alittaa tilan kastepisteen. (Scandinavian Copper Development Association). Liuospumppu mitoitetaan tarvittavaa jäähdystehoä vastaavalle virtaamalle ja vaadittavalle nostokorkeudelle. Pumpun valinta on helppoa valmistajien tekemistä käyrästöistä, joissa on ilmoitettu kyseiset virtaama ja nostokorkeus (Scandinavian Copper Development Association). Kuvassa 12 käyrästö eräästä Wilon pumpusta. Kuvassa tummenettu alue kuvaa pumpun toiminta aluetta. Lisäksi on otettava huomioon putkiston aiheuttama painehäviö. (Wilo-pumput ja säätölaitteet, 2005.)



Kuva 12. Wilo-Veroline-IP-E40/150-3/2 pumpun toimitaalue. (Wilo-pumput ja säätölaitteet, 2005.)

6.6 Paikallisjäähdyttimen mitoitus ja tehonsäätö

Tyypillisesti huoneilmaa jäähdytetään joko paikallisilla jäähdytyspattereilla tai ilmastointikanavassa olevalla jäähdytyspatterilla. Molemmat ovat samantyyppisiä toiminnaltaan. Jäähdytyspatterissa jäähdytettävä ilma kulkee patterin läpi, jossa erityyppisin keinoin liuos jäähdyttää ilmaa. Jäähdytyspatterin valintaan vaikuttavia tekijöitä on useita. Mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä ovat

- *jäähdytysteho*
- *tulevan ilman lämpötila ja kosteus*
- *tulevan ja lähtevän liuoksen lämpötilat*
- *käytettävä liuos*
- *liuospuolen painehäviö*
- *lamellijako*

- *koko*
(Hakala 2005, 90)

Jäähdytyspatterin valinta tapahtuu yleensä valmistajien valintaohjelmilla. Tämä on helpoin tapa varsinkin uudisrakentamisessa. Peruskorjausprojekteissa yleensä laitteelle on jo olemassa tila, johon sen pitää mahtua. Monesti joudutaan tekemään vaihtoehtoisia ratkaisuja. (Hakala 2005, 90.)

Tehon säädössä on viime aikoina edistytty paljon, pääasiassa taajuusmuuntajaohjattujen puhaltimien ansiosta. Lisäksi piirissä on yleensä 3-tieventtiili, joka helpottaa kompressorin toimintaa ajettaessa osakuormilla. Varsinkin ilmastointikäytössä vuodenaikojen vaihtelut aiheuttavat paljon osakuormilla ajoa.

7 HUOLTO

Vuoden 2008 alusta alkaen astui voimaan energiatehokkuusdirektiivi 2002/91/EY artikla 9. Kyseisessä artiklassa ohjeistetaan ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmien määräaikaistarkastuksista. Vanhassa tarkastusohjelmassa vuototarkastukset määräytyivät kylmäainetäytöksen mukaan. Uudessa artiklassa tarkastukset määräytyvät jäähdytyslaitoksen tehon mukaan. (Kylmäalan julkaisu 2008, 41.)

Tarkastukset on luokiteltu kolmeen teholuokkaan ja kahteen tarkastustasoon. Koneiston tarkastuksessa tarkastetaan koneiston ja siihen liittyvien laitteistojen toiminta ja kunto. Järjestelmätason tarkastuksessa paneudutaan koko rakennuksen energiatehokkuuteen jäähdytysjärjestelmän kannalta. Lisäksi selvitetään mahdollisuuksia parantaa laitteiston energiatehokkuutta ja mahdollisuutta vähentää jäähdytystarvetta. Koneisto tarkastus suoritetaan 5 vuoden välein ja järjestelmätasotarkastus 10 vuoden välein. Ilmastointilaitoksien määräaikaistarkastusten teettäminen ajallaan on kiinteistönomistajien vastuulla. (Kylmäalan julkaisu 2008, 41-42.)

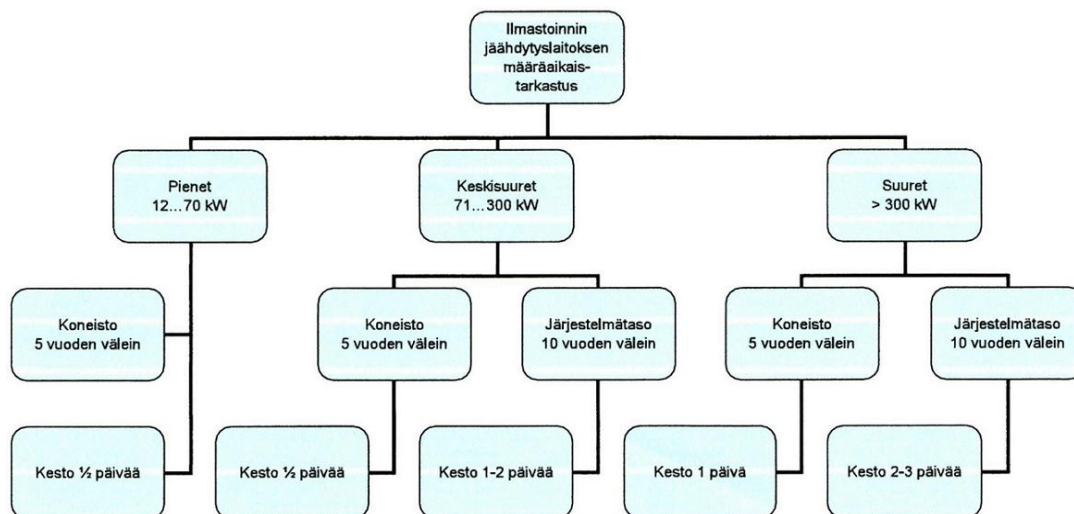
Ilmastointilaitoksen määräaikaistarkastuksista on kirjoitettava aina tarkastusraportti. Raportin laajuus määräytyy ilmastointilaitoksen jäähdytyskoneiston teholuokan

mukaan. Tarkastusraporttien rakenne on kuitenkin samanlainen riippumatta laitoksen tehosta. Siitä ilmenevät seuraavat asiat:

- järjestelmän kuvaus (alkuperäiset mitoitusarvot)
- suoritettut mittaukset ja tarkastukset
- mittausten tulokset ja analysointi
- säästöpotentiaali
- suositeltavat jatkotoimenpiteet.

(Kylmäalan julkaisu 2008, 42-43)

Tarkastuksista tehdään tarkastuspöytäkirja, joka liitetään raporttiin. Jokaiselle koneistotyypille on tehty omat tarkastuspöytäkirjamallit. Tarkastuspöytäkirjat tulee säilyttää kiinteistössä kymmenen vuoden ajan. Mikäli tarkastuksissa on tullut huomautuksia tai korjauskehotuksia, tulee ne kiinteistöomistajan toimesta saattaa ajantasalle. (Kylmäalan julkaisu 2008, 43)



Kuva 13, Ilmastoinnin jäähdytyslaitoksen määräaikaistarkastusten aikataulu (Kylmäalan julkaisu 2008, 41).

8 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli antaa tietoa rakennusvalvojille kylmälaitoksen suunnittelusta ja mitoittamisesta, ja siinä onnistuttiin melko hyvin. Työtä tehtäessä huomattiin, kuinka vaikeaa ilmastointilaitoksen suunnittelu on. Työtä aloitettaessa ei osattu ennakoida,

kuinka laajaksi työ voi paisua, mikäli otetaan huomioon kaikki seikat yksityiskohtaisesti. Työtä täytyi rajata ja pariin kertaan miettiä uudestaan, mitä kannattaisi tutkia enemmän. Vaikein osio oli itse laitoksen komponenttien mitoittaminen. Tarkat mitoitukset ovatkin jo toisen opinnäytetyön mittainen työ, joten ne jätettiin pois kokonaan. Koska opinnäytetyö liittyy, puolustusvoimien alukseen, oli monta kertaa tutkimusten esteenä turvaluokitusleima. Siksi jouduin poistamaan kaikki numeeriset arvot laskuista.

Nykyaikana on nousevana trendinä ollut ilmastonmuutos ja ekologisuus. Tätä työtä tehdessä tuli mieleen monta kertaa, miten itse pystyn vaikuttamaan ilmaston suunnittelussa ilmastonmuutokseen. Kylmäaineet ovat muuttuneet viime vuosien aikana entistä ympäristöystävällisemmiksi. Kylmäkoneiston suunnittelussa voidaan tehdä monta hyvää tekoa. Vaikka itse kylmäntekoprosessi ei juurikaan muutu, eletroniikan lisääminen prosessin valvontaan sekä materiaalivalinnat eristyksissä vaikuttavat.

Viime aikoina uutisissa ja lehdissä on ollut esillä rakentamisessa käytettävän eristyksen paksuus ja materiaalit. Tätä työtä tehdessäni huomasin, että pienillä lisäeristyksillä voidaan vaikuttaa huomattavasti energian kulutukseen niin jäähdytyksessä kuin lämmityksessä. Rakenteellisten eristyksien lisäksi ilmanvaihdon parantaminen esimerkiksi lämmön talteenotolla vähentää energian kulutusta. Näiden kahden asian parantaminen voi tulla paljon halvemmaksi kuin ilmaston uusiminen tehokkaammaksi. Tässä työssä käsitellyn laivan jäähdyttäminen on todella tärkeää miehistön toimintakyvyn ylläpitämiseksi ja samalla taistelunäkyvyn säilyttämiseksi. Kuumuutta on vaikea päästä pakoon.

Laissa määrättyjä velvoitteita kylmälaitoksille on varsin vähän. Suurimmat velvoitteet tulevat kylmäaineiden puolelta. Toinen merkittävä asetus koskee kylmäainelaitoksien tarkastuksia. Tulevaisuudessa on mielenkiintoista nähdä, miten lainsäädäntö muuttuu kylmäaineiden osalta ja miten niissä kehitytään.

Työtä tehdessäni mietin usein rakennusvalvojan silmin kylmälaitoksen rakentamista ja mitä tietoa valvojalla tulisi olla käytössään aloittaessaan valvontaa. Monta kertaa tuli mieleen, miten valvoja voi varmistua, että kyseiset suunnitelmat ovat tarkkoja. Toisaalta jos valvoja pystyy laskemaan suurin piirtein alukselle syntyvän lämpökuorman, se helpottaa laitteiston mitoituksen tarkastuksia.

Opinnäytetyön tekeminen oli todella opettavaista ja antoisaa. Monta kertaa tuli kyllä mieleen, ettei työ valmistu koskaan. Lukuisten vastoinkäymisten jälkeen selvisivät työn suuntaviivat. Työn suunnan löytämisen jälkeen kirjoittaminen helpottui huomattavasti. Työstä jää uupumaan tarkat laskelmat komponenttien osalta, mutta se vaatiikin kokonaan uuden opinnäytetyön.

LÄHTEET

Aittomäki Antero (toim.). 1993. Kylmä tekniikka. Helsinki: Kylmätuki Oy.

Australwright metal datasheets. Saatavissa:

<http://www.australwright.com.au/datasheets/alloys/Aluminium/Aluminium%205083.pdf> (viitattu 11.11.2011)

Finlex, Suomen rakentamismääräyskokoelma osa C4. Saatavissa:

<http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf> (viitattu 11.11.2011)

Hakala, Pertti. 2005. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus.

Kylmäalan julkaisu 2008. Saatavissa: <http://www.skll.fi/www/att.php?type=2&id=53> (viitattu 10.11.2011)

Nydal, Roald. 2002. Käytännön kylmätekniikka. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys ry.

Scandinavian Copper Development Association. Saatavissa:

http://www.koppar.com/files/Komfortkyla_FI.pdf(viitattu 10.11.2011)

Suomen Kylmäyhdistys ry. 1981. Kylmäntarpeen laskenta.

Suomen Kylmäyhdistys ry. 1993. R-kylmälaitoksen suunnittelu ja mitoitus.

Suomen kylmäliikkeiden liitto r.y, 2008. Saatavissa:

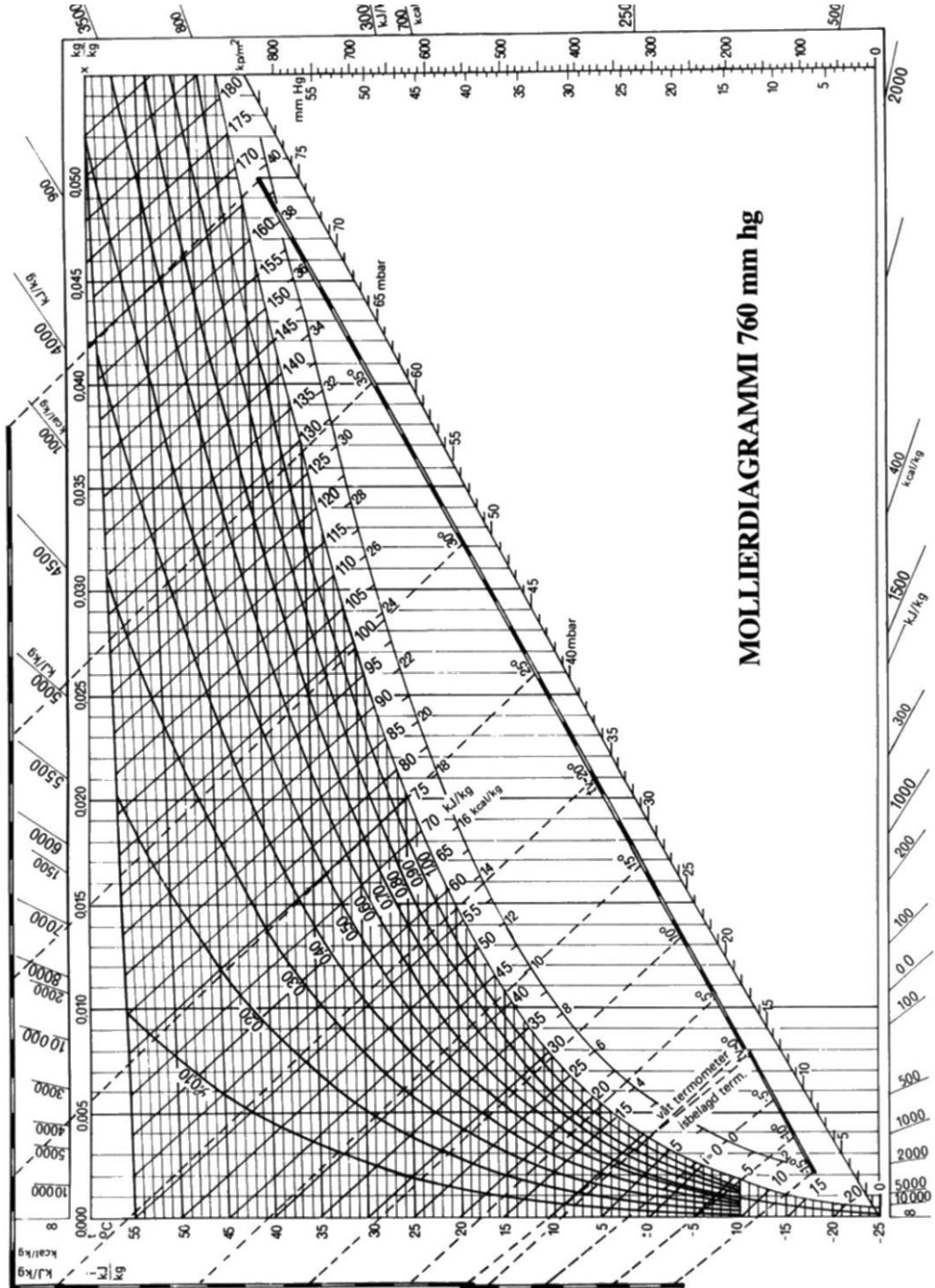
<http://www.skll.fi/www/att.php?id=45> (viitattu 11.11.2011)

Wilo-pumput ja säätölaitteet, 2005. Saatavissa: http://www.wilo.de/cps/rde/xbcr/fi-fi/New_Cat_2005-03_HVAC_EN.pdf (viitattu 10.11.2011)

Wikipedia. saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:FNS_Porvoo.jpg(viitattu 24.1.2012)

LIITTEET

Liite 1. Mollier-diagrammi



Liite 2. Putkistonmitoitustaulukko R407C

Putkimitoitustaulukko R407C

Cu-putki Koko (mm)	Imuputki, teho (kW) dt = 0,04 °K/m = 1,0 °K/25 m				Paineputki, teho (kW) dt = 0,02 °K/m = 0,5 °K/25 m		Lauhde- ja nesteputket Teho (kW)	
	Höyrystyslämpötila (°C)				Höyrystyslämpötila (°C)		0,5 m/s	dt = 0,02 °K/m
	-10	0	5	10	0	10		
10	0,49	0,71	0,85	1,00	1,33	1,41	4,0	6,1
12	0,89	1,29	1,53	1,82	2,4	2,6	6,4	11,1
15	1,78	2,6	3,1	3,6	4,9	5,1	10,7	22
18	3,1	4,5	5,3	6,3	8,5	8,9	16,1	40
22	5,6	8,1	9,6	11,4	15,2	16,0	25	72
28	10,1	14,6	17,4	20	28	29	40	132
35	19,4	28	33	39	52	55	65	246
42	33	47	56	66	88	93	97	416
54	63	91	108	127	169	179	160	820
64	102	147	174	205	273	288	230	1330
76	164	237	281	331	440	461	331	2080
89	254	366	434	510	680	710	460	3320
108	420	605	717	842	1010	1170	670	5320

Taulukon laskentaperusteita:

Lauhtumislämpötila +40 °C
Imuputken laskennassa imukaasun tulistus 20 °K

Paineputken laskennassa isentrooppinen hyötysuhde 70 %

Lauhde- ja nesteputken laskennassa höyrystyslämpötila +5 °C

Korjauskertoimet eri lauhtumislämpötiloille, painehäviöille ja ekvivalenttiputkipituuksille:

Lauhtumis- lämpötila(°C)	Imu- putki	Paine- putki	Lauhde-/nesteputki	
			0,5 m/s	dt=0,02°K/m
20	1,21	0,74	1,31	1,00
30	1,11	0,87	1,16	1,01
40	1,00	1,00	1,00	1,00
50	0,89	1,12	0,84	0,96

Ekvivalentti putkipituus(m)	Korjaus- kerroin
10	1,65
20	1,13
25	1,00
30	0,90
40	0,77
50	0,68
60	0,62
80	0,53
100	0,47

Taulukko 5.8.

R407C Putkimitoitustaulukko.

Öljyn palautus putkinousussa R407C

Cu-putki Koko (mm)	Imuputki, minimiteho (kW)			Paineputki, minimiteho (kW)		
	Höyrystyslämpötila (°C)			Höyrystyslämpötila (°C)		
	-10	0	10	-10	0	10
12	0,29	0,35	0,43	0,72	0,76	0,80
15	0,55	0,68	0,82	1,38	1,45	1,52
18	0,93	1,14	1,38	2,4	2,5	2,6
22	1,62	2,0	2,4	4,1	4,3	4,5
28	2,9	3,6	4,2	7,1	7,5	7,9
35	5,3	6,5	7,8	13,2	13,9	14,6
42	8,6	10,6	12,8	22	23	24
54	16,0	20	24	41	43	44
64	26	32	38	64	67	70
76	40	49	59	100	105	110
89	60	75	90	152	160	166
108	97	120	145	247	258	269

Taulukon laskentaperusteita:

Lauhtumislämpötila +40 °C

Imuputken laskennassa imukaasun tulistus 20 °K

Paineputken laskennassa isentrooppinen hyötysuhde 70 %

Öljyn tiheys 1 kg/dm

Korjauskertoimet eri lauhtumislämpötiloille

Lauhtumis- lämpötila(°C)	Imu- putki	Paine- putki
30	1,10	1,02
40	1,00	1,00
50	0,89	0,96

Taulukko 5.9.

R407C öljynpalautus putkinousussa.