



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Sakari Mikkola

## Ulkotekojään energiajärjestelmä Lämmöpumppauksen mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

27.04.2019

Tekijä Otsikko	Sakari Mikkola Ulkotekojään energiajärjestelmä: lämmönpumppauksen mitoitus
Sivumäärä Aika	56 sivua + 1 liite 27.04.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	diplomi-insinööri Mika Autiopelto diplomi-insinööri Esko Kaappola yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on antaa lukijalle tietoutta ulkotekojään lämmönpumppausjärjestelmän laitevaihtoehdoista sekä mitoitusperusteista osana tekojään energiajärjestelmän kokonaisuutta. Tavoitteena on järjestelmän pääkomponenttien toiminnallinen mitoitus sekä tarkemman tehomitoituksen luoma hankinta- sekä ylläpitokustannuksien pienentäminen.</p> <p>Ulkotekojäiden energiajärjestelmien mitoituksessa on aiemmin käytetty toimiviksi todettuja kokemusperäisiä mitoitusarvoja. Ne ovat kuitenkin mahdollisesti johtaneet laitoksien ylimitoitukseen. Tämä insinööriyö käsittelee lämmönpumppausjärjestelmän tapauskohtaista mitoitusta ja sen mahdollisuutta vaikuttaa tarkemman mitoituksen tavoitteluun osana koko ulkotekojään energiajärjestelmää.</p> <p>Projektissa tarkastellaan ulkotekojääkohteen lämmönpumppausjärjestelmää, jossa on kylmäaineena ammoniakki ja laitoksen höyrystinteho on 1,8 MW. Insinööriyössä käsitellään ammoniakkijärjestelmän pääkomponenttien mitoitukseen tarvittavia lähtötietoja sekä mitoitusperusteita. Työn perusteella ulkotekojään energiajärjestelmän suunnittelijalla on näkemys eri laitevaihtoehdoista lämmönpumppausjärjestelmässä sekä tietoa pääkomponenttien mitoituksesta.</p> <p>Ilmaston lämpenemisestä johtuen luonnonjäiden käyttöaika lyhenee jatkuvasti leutojen talvien myötä. Tarkan tapauskohtaisen ulkotekojään suunnittelun avulla pyritään alentamaan kustannuksia läpi järjestelmän elinkaaren ja näin alentamaan liikuntapalveluiden tuottajien kynnystä uusien ulkotekojäiden hankkimiseen.</p>	
Avainsanat	ulkotekojää, lämmönpumppausjärjestelmä, energiatehokkuus

Author Title Number of Pages Date	Sakari Mikkola Energy System of Artificial Outdoor Ice Rink: Dimensioning of Heat Pump System 56 pages + 1 appendix 27 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Mika Autiopelto, Master of Science (Technology) Esko Kaappola, Master of Science (Technology) Aki Valkeapää, Principal Lecturer
<p>The purpose of the Bachelor's thesis was to present matters that should be taken into consideration when designing energy-efficient outdoor ice rinks, but also to provide producers of sporting services with information about lowering the costs throughout the lifespan of the systems.</p> <p>The thesis hypothesized that the estimated values used in the design of artificial outdoor ice rinks have probably led to oversized energy systems. The main target was, therefore, to construct more energy efficient outdoor sporting facilities, and to show that the costs of purchasing and maintaining new outdoor ice rinks would be lower than those of the previous systems.</p> <p>The thesis studied an ice rink under construction with a 1.8 MW heat pumping system with ammonia as a refrigerant. The thesis focused on choosing and dimensioning the most suitable components for the system. Thus, valuable information was collected about various components for ice rinks.</p> <p>The Bachelor's thesis offers information about the components and design of a heat pump system for an artificial outdoor ice rink to ensure that the designer is familiar with the components of the system, and able to dimension the components.</p>	
Keywords	artificial ice rink, heat pump system, energy-efficiency

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämmönpumppaus	3
2.1	Mitoitusparametrit	3
2.2	Höyrystin	5
2.3	Kylmäaine	11
2.4	Kompressorit	14
2.5	Putkisto	17
2.6	Lauhdutin	25
2.7	Eistäminen	28
3	Tulokset	34
3.1	Laitoksen toimintaselostus	34
3.2	Höyrystin	35
3.3	Kompressorit	38
3.4	Öljyjärjestelmä	46
3.5	Putkisto	47
3.6	Lauhdutin	50
4	Pohdinnat	52
4.1	Kylmäkoneistojen suunnittelu	52
4.2	Kylmäaine	52
4.3	Lauhdelämmön hyödyntäminen	53
4.4	Itsearviointi	53
	Lähteet	55

### Liitteet

Liite 1. Danfoss Oy CoolSelector2 putkimitoitusraportti

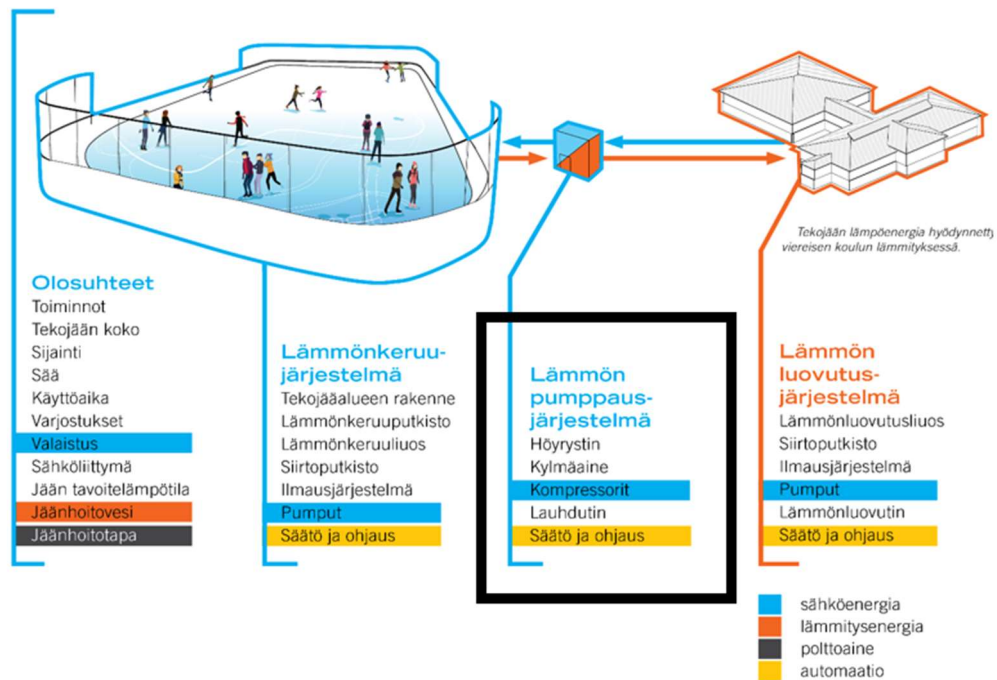
## Käsitteet

EER	Energy Efficiency Rate. Tarkoittaa samaa kuin kylmäkerroin.
GWP	Global Warming Potential. Kuvastaa aineen vaikutusta ilmaston lämpenemiseen.
Kylmäkerroin	Kylmäprosessin hyötysuhteesta käytetty termi.
Lämmönkeruujärjestelmä	Energiajärjestelmäkokonaisuudessa käytetty termi tekojään kylmäliuosjärjestelmästä.
Lämmönluovutusjärjestelmä	Energiajärjestelmäkokonaisuudessa käytetty termi lauhdutinjärjestelmästä.
Lämmöpumppausjärjestelmä	Energiajärjestelmäkokonaisuudessa käytetty termi kylmäkoneistolle.
ODP	Ozone Depletion Potential. Kuvastaa aineen vaikutusta otsonikatoon.
Ulkotekojää	Keinotekoisesti ulkoilmaan tehty jääalue.

## 1 Johdanto

Tämä insinöörityö on laadittu työn tilaajan FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n johtavan energia-asiantuntijan Mika Autiopellon pyynnöstä avustamaan tulevien tekojääprojektien suunnittelua. Yrityksen kasvava toiminta tekojääratojen suunnittelussa on luonut tarpeen lämmönpumppausjärjestelmien mitoitusohjeelle. Insinöörityötä tullaan käyttämään osana suunnittelua ja kustannusarvioita tulevissa projekteissa. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy on Suomessa ensimmäisiä konsulttiyrityksiä jotka käyttävät dynaamista simulointiohjelmaa osana tekojäiden suunnittelua ja energialaskentaa.

Ulkotekojäät on yleisesti toteutettu välillisten kylmäjärjestelmien avulla [3, s. 9]. Tässä työssä tarkastellaan yksinomaan lämmönpumppausjärjestelmän mitoitusta. Lämmönkeruu- ja lämmönluovutusjärjestelmän mitoitusta ja suunnittelua käsitellään tulevissa opinäytetöissä FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n toimeksiannosta. Työn rajausta selventää kuva 1.



Kuva 1. Tekojään energiajärjestelmän kokonaisuus [23].

Talviurheilu ja erityisesti jäälajit ovat olleet kautta aikain suomalaisten suuressa suosiossa. Tätä suosiota kuvastaa hyvin jäähallien määrä Suomessa, noin 280 hallia. Nämä hallit ovat kuitenkin pääsääntöisesti urheiluseurojen käytössä, jolloin vapaamuotoisen luistelun ja jääpelien harrastajat ovat käyttäneet luonnonjäitä. Leudot talvet ovat kuitenkin rajoittaneet luonnonjäiden käytön vain pariin kuukauteen vuodessa. Ilmaston lämpenemisen johdosta onkin hyvin mahdollista, että ulkotekojäiden kysyntä kasvaa tulevien vuosien aikana. Ensimmäinen ulkotekojääkenttä valmistui Tampereen Koulukadulle jo vuonna 1956 [2, s. 325], ja nykyään ulkotekojäitä on maanlaajuisesti 35 kappaletta, joista 18 sijaitsee pääkaupunkiseudulla [10; 11; 12].

Tekojäiden mitoituksessa on aikaisemmin käytetty kokemusperäisiä arvoja, minkä takia kenttien jäähdytysteho on ylimitoitettu. Ylimitoitus kasvattaa hankinta- ja ylläpitokustannuksia. Mitoitussimuloinnit ovat vastaus tähän ylimitoitukseen. Tarkan olosuhdetarkastelun ansiosta kenttien tehontarve eri olosuhteissa saadaan selvitettyä tarkemmin, jolloin voidaan varmistua pienempitehoisten koneistojen riittävydestä. Tällöin elinkaarikustannuksia saadaan madallettua, ja tämän voisi uskoa alentavan esimerkiksi kuntien kynnystä tilata ulkotekojäitä asukkaidensa käyttöön.

Teollista kylmää käsittelevää kirjallisuutta on suomeksi erittäin vähän. Teollisella kylmällä tarkoitetaan yleisesti esimerkiksi prosessiteollisuuden jäähdytystä ja tekojääkenttiä, joille ominaista on suuri kylmäteho [1, s. 189]. Tekojäiden energiajärjestelmän suunnittelu on yleisesti ollut urakoitsijoiden ja laitevalmistajien vastuulla, minkä johdosta tietoa ei ole yleisesti jaettu. Tälläkin hetkellä tekojäitä suunnittelevia ja rakentavia tahoja on Suomessa vain kourallinen. Tarve lämmönpumppausjärjestelmän suunnitteluohjeelle syntyi suomenkielisen teollisen kylmän suunnitteluohjemateriaalin puutteesta ja tiedon hajanaisuudesta. Tämä työ sisältää kootut suunnitteluohjeet eri lähteistä tekojään lämmönpumppausjärjestelmän pääkomponenttien suunnittelua varten.

FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy pyrkii konsulttitoiminnallaan vaikuttamaan tulevaisuudessa rakennettavien ulkotekojäiden energiatehokkuuteen ja näin toteuttamaan asiakkailleen kustannustehokkaita ratkaisuja. Tapauskohtaisesti mitoitettujen energiajärjestelmät ovat hankinta- sekä käyttökustannuksiltaan alhaisempia. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n tavoitteena on tuottaa insinööritöitä, jotka toimivat suunnitteluohjeina tulevissa tekojäähankkeissa. Markkinoiden kasvusta johtuen on yrityksen edun mukaista,

että tekojaiden kokonaisvaltaisesta suunnittelusta olisi ohjeet yrityksen käyttöön. Ohjekokoelman avulla voidaan toteuttaa asiakkaille korkealaatuisia tapauskohtaisia suunnitelmia sekä tutkia tarkemmin mahdollisia säästötoimenpiteitä hankkeen kustannuksissa.

Tämä työ sisältää tekojään lämmönpumppausjärjestelmän mitoituksen osana koko ulkotekojään energijärjestelmän mitoitusta käsitteleviä insinööritöitä. Työssä käsitellään tekojään ammoniakki kylmäkoneiston pääkomponenttien sekä putkisto-osien mitoitus, joiden avulla saadaan suuntaa antavaa kustannustietoa asiakkaalle. Pääkomponenttien lisäksi on todelliseen kylmäkoneiston mitoitukseen otettava mukaan myös muut komponentit. Näiden komponenttien mitoitukseen ei kuitenkaan tässä työssä ole otettu kantaa, sillä työn laajuus olisi kasvanut liian suureksi.

Insinööriyön alussa selvitetään lukijalle työn laatimiseen johtaneet syyt ja miksi työ on tehty. Tämän lisäksi kappaleessa on määritelty työn rajaus sekä rakenne. Tämän jälkeen selvitetään lukijalle kylmäkoneiston pääkomponenttien laitevaihtoehtoja sekä käydään läpi niiden teoreettista mitoitusta ja valintaa koskevia näkökulmia. Teoreettista mitoitusta on tämän jälkeen sovellettu esimerkkikohteen laitevalintojen tarkastelussa, sekä käyty läpi esimerkkikohteen laitevalinnat ja mitoitusperusteet. Työn loppuosassa on selvitetty työn tekemisen aikana ilmenneitä haasteita ja pohdittu mahdollisia lisätutkimusta vaativia tekijöitä.

## 2 Lämmönpumppaus

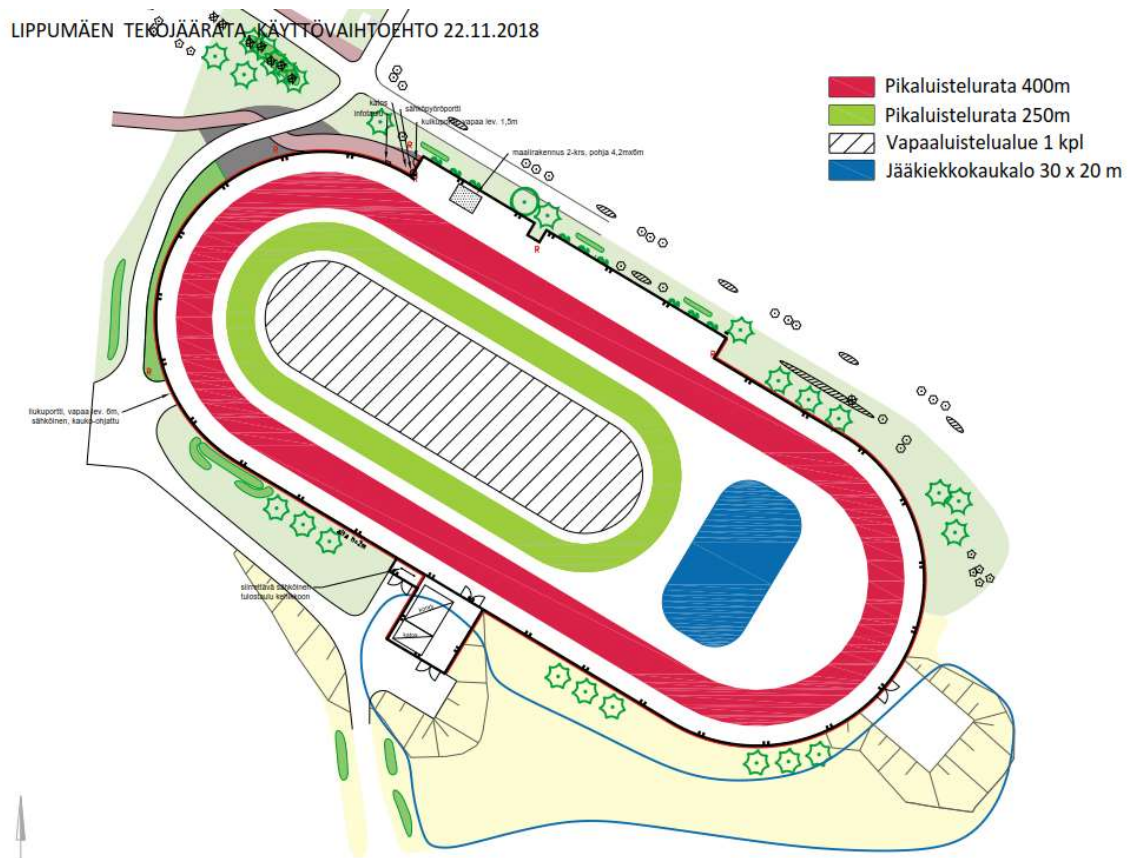
### 2.1 Mitoitusparametrit

Tässä työssä on käytetty esimerkkinä Lippumäen tekojäärataa (kuva 2) Kuopiossa. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy on toiminut suunnittelijana ja energijärjestelmän asiantuntijana kohteessa. Kohde on tämän työn kirjoitusvaiheessa rakenteilla ja on määrä valmistua keväällä 2019. Lippumäen tekojääradan jäädytettävän alueen koko on noin 11 800 m<sup>2</sup> ja sisältää seuraavat toiminnot:



- pikaluistelurata 400 m
- pikaluistelurata 250 m
- jääkiekkokaukalo 30 x 20 m
- vapaaluistelualue.

Vaikka tämä työ ei sisällä lämmönkeruupiirin mitoitusta on tiedettävä joitakin asioita lämmönpumppausjärjestelmän mitoitusta varten. Ulkotekojään jäädytys aloitetaan ulkolämpötilan tippuessa alle 5 °C:n, ja lopetetaan ulkolämpötilan noustessa yli 5 °C:n. Rataputkistomateriaalina on käytetty 25 mm:n PE-putkea, ja se on asennettu 100 mm:n välein asfalttiurapohjaan. Lämmönkeruuliukseksi on valittu 28-prosenttinen kalsiumkloridiliuos. Kenttä on jaettu neljään, pinta-alaltaan yhtä suureen jäähdytyslohkoon. Lämmönkeruuliuksen maasta keräämä lämpö ohjataan siirtoputkiston välityksellä konehuonetilassa sijaitsevalle nestejäähdyttimelle, joka toimii tämän työn lämmönpumppausjärjestelmän höyrystimenä. Tehomitoituksen simuloinneista valittiin järjestelmän höyrystinhuipputehoksi 1 800 kW. [16, s. 3.] Huipputehon määrittää tekojääkohteissa veden jäätyminen tiettyjen aika- ja energiakustannusparametrien välillä. Jäätä ylläpitävä teho on huomattavasti pienempi, ja koneistoa ajetaankin suurimman osan käyttöajasta osateholla. Huippujäähdystehoä käytetään mitoitusarvona lämmönpumppausjärjestelmän mitoitukseen.



Kuva 2. Lippumäen tekojään yleissuunnitelman mukainen käyttötarkoitus [18].

## 2.2 Höyrystin

Kylmäaineen höyrystyminen eli kiehumisen voidaan jakaa kahteen eri kiehumistapaan, allaskiehumiseen ja virtauskiehumiseen. Allaskiehumisessa kylmäainetta lämmittävä pinta on upotettu kylmäaineeseen, eikä kylmäaine ole pakotetussa virtauksessa. Pinnan lämpötilan ylittäessä riittävästi kylmäaineen kyllästyslämpötilan höyrystimessä vallitsevassa paineessa alkaa kylmäaine höyrystyä. Höyrökuplat nousevat ylöspäin, ja lisää nestemäistä kylmäainetta pääsee lämmönsiirtopinnalle. Märkähöyrystimet perustuvat allaskiehumiseen. Virtauskiehumisessa sen sijaan pakotetulla virtauksella saadaan höyrystyminen aikaan esimerkiksi putkessa. Höyrystimen syöttöpäästä pumpataan sisään nestemäistä kylmäainetta, joka höyrystyy ja poistuu höyrystimestä kaasuna. Kuiva-höyrystys perustuu virtauskiehumiseen. [2, s. 169–171.]

Höyrystimet ovat toimintaperiaatteiltaan lämmönvaihtimia. Lämmönvaihtimeksi määritellään kaksi toisistaan seinämällä erotettua virtaavaa ainetta, jotka siirtävät keskenään lämpöenergiaa [3, s. 102]. Lämmönvaihtimen tehoa voidaan arvioida yhtälöllä 1 [2, s. 175].

$$\phi_h = UA\Delta T_{ln} \quad (1)$$

U on lämmönläpäisykerroin (W/m<sup>2</sup>K)

A on lämmönsiirtopinta-ala (m<sup>2</sup>)

$\Delta T_{ln}$  on logaritminen lämpötilaero (K)

Eryttypisten höyrystimien U-arvoja on esitetty taulukossa 1.

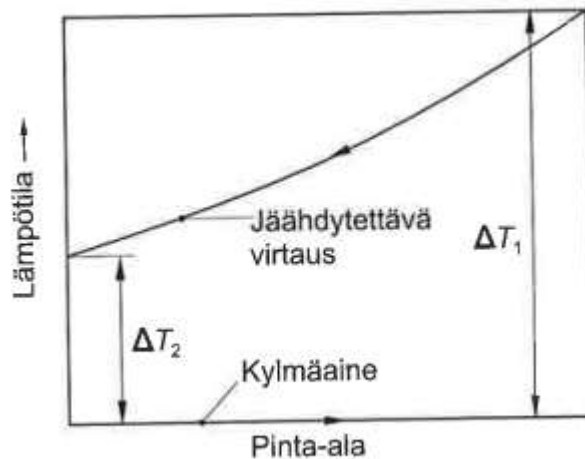
Taulukko 1. Eryttypisten höyrystimien lämmönläpäisykertoimia. [2 s. 177]

Rakenne	Jäähdytettävä väliaine	U W/Km <sup>2</sup>
Levylämmönsiirrin	Vesi	800...2000
	Liuos	500...1500
Moniputkihöyrystin, sileät putket, kylmäaine vaipassa	Vesi	300...800
	Suolaliuos	250...600
Moniputkihöyrystin, rivotetut putket, kylmäaine vaipassa	Vesi	500...1000
	Suolaliuos	400...800
Moniputkihöyrystin, sileät putket, kylmäaine sisäputkissa	Vesi	250...700
	Suolaliuos	200...500
Moniputkihöyrystin, rivotetut sisäputket, kylmäaine sisäputkissa	Vesi	500...1400
Pystyputkihöyrystin, sileät putket	Vesi	250...400
	Suolaliuos	200...300

Logaritminen lämpötila  $\Delta T_{ln}$  voidaan laskea yhtälöllä 2 [2, s. 175].

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (2)$$

$\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$  on esitetty kuvassa 3 [2, s. 176].



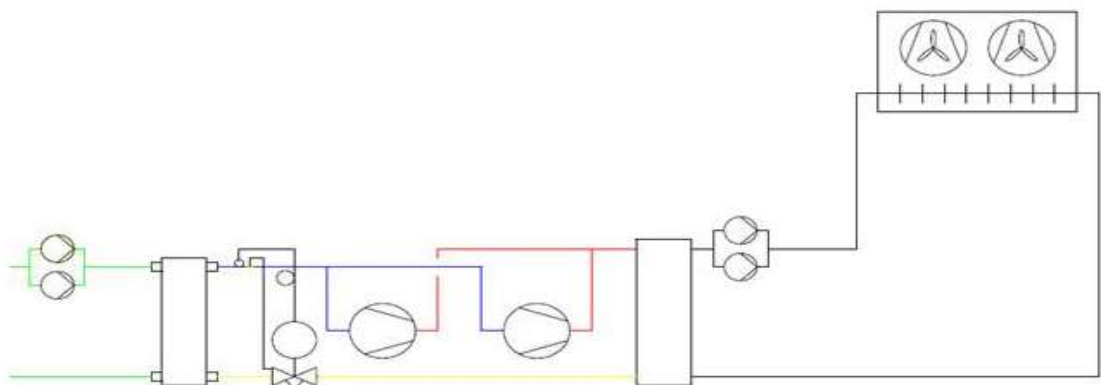
Kuva 3. Yksinkertainen höyrystimen lämpötilakaavio jossa esitetty lämpötilaerot.

Höyrystimet mitoitetaan yleisesti ottaen laitevalmistajien valinta- ja mitoitusohjelmilla, sillä edellä mainitut lämmönläpäisykertoimet ovat varjeltuja liikesalaisuuksia [3, s. 104]. Täten höyrystimen lopullinen mitoitus on erittäin hankalaa ilman valmistajien mitoitus tietoja. Suunnittelijalla tulee kuitenkin olla käsitys höyrystimen mitoitukseen vaikuttavista tekijöistä:

- kylmäaine
- vaadittava kylmäteho
- kylmäaineen höyrystymislämpötila
- toisiopuolen kylmäliuoksen lämpötilanmuutos meno- ja paluunesteen välillä
- toisiopuolen lähtevän nesteen lämpötila
- toisiopuolen suurin sallittu painehäviö
- toisiopuolen likaantumisvastus. [1, s. 86]

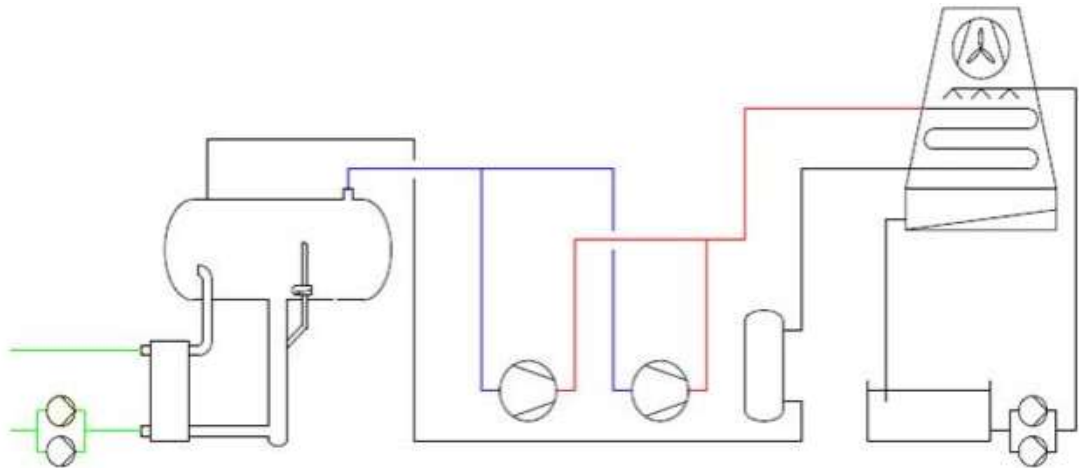
Tekojääkokoluokan suuret kylmälaitokset ovat yleisesti märkähöyrysteisiä ja vaativat vähintään 2 asteen lämpötilaeron lähtevän kylmäliuoksen ja kylmäaineen höyrystyslämpötilan välille. Kuivahöyrysteisissä järjestelmissä sama lämpötilaero tulee olla korkeampi, sillä tulistusta vaaditaan vähintään 5 astetta höyrystimessä. Lämpötilaliukuman omaavat kylmäaineet vaativat vielä suuremman, vähintään 7 asteen lämpötilaeron laitoksen toiminnan varmistamiseksi. [3, s. 112.] Lisätulistus voidaan saada aikaan erillisellä lämmönsiirtimellä [22].

Höyrystimen mitoitustietojen ja periaatteiden lisäksi suunnittelijan tulee myös olla tietoinen eri höyrystintyyppien eroista ja ominaisuuksista osatakseen valikoida käyttötarkoitukseen sopivan höyrystintyyppin. Höyrystimet voidaan toimintansa perusteella jakaa kuiva- sekä märkähöyrysteisiin. Välilliset kylmälaitokset ovat perinteisesti olleet märkähöyrysteisiä, kuitenkin viime aikoina myös kuivahöyrysteiset järjestelmät ovat yleistyneet. [1, s. 190.] Tekojään kylmäkoneistot ovat kuitenkin suuren tehonsa vuoksi lähes aina märkähöyrysteisiä. Kuivahöyrysteisessä järjestelmässä koneiston höyrystimelle johdettu kylmäaine höyrystyy kokonaisuudessaan. Mahdollisimman suuren lämpötilaeron mahdollistamiseksi kylmäaineen ja kylmäliuoksen välillä, toimii höyrystin vastavirtaperiaatteella. Vastavirtahöyrystimessä kylmäainevirta ja kylmäliuosvirta kulkevat toisiinsa vastaan (kuva 4). Suuren lämpötilaeron ansiosta höyrystimen teho saadaan maksimoitua. Jotta höyrystyslämpötila voidaan pitää mahdollisimman korkeana, käytetään järjestelmässä elektronista paisuntaventtiiliä joka säätää kylmäaineen syöttöä höyrystimeen tulistumisen perusteella. [1, s. 190.] Kuvassa 4 on esitetty yksinkertaisen kuivahöyrysteisen kylmäkoneiston toiminta [22].



Kuva 4. Kuivahöyrysteisen kylmäkoneiston periaatekuva [22].

Märkähöyrysteisessä järjestelmässä kylmäkoneiston höyrystimeen ohjataan enemmän nestemäistä kylmäainetta kuin siinä höyrystyy. Lämmönsiirtopinta-alan tarve on pienempi kuin kuivahöyrystimissä, sillä tulistuksen vaatimaa lämmönsiirtopinta-alaa ei tarvita. Märkähöyrysteiset järjestelmät on aina varustettava pisaranerottimella, sillä nestemäisen kylmäaineen pääsy kompressoreille aiheuttaa nesteiskuja. Nesteenerotin toimii pisaranerottimeksi, jolloin painovoimaisesti varmistetaan ainoastaan kaasun pääsy kompressorille. [1, s. 191.]



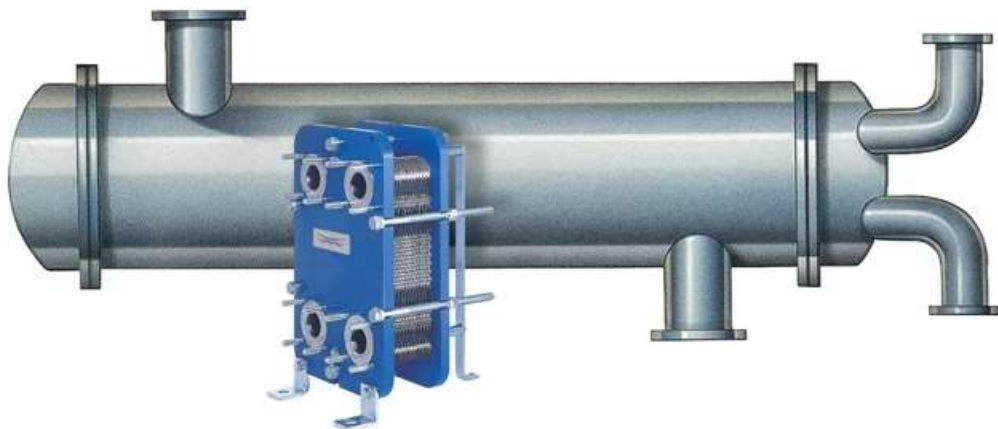
Kuva 5. Vapaakiertoisen märkähöyrysteisen kylmäkoneiston periaatekuva [22].

Märkähöyrystimet voidaan toteuttaa joko pumppukiertoisesti tai painovoimakiertoisesti. Pumppukiertoisessa höyrystimessä kylmäainetta kierrätetään höyrystimen ja nestesäilön välillä pumpun avulla. Höyrystimen joka toisessa levyvälissä virtaa jäähdytettävää nestettä ja joka toisessa kylmäainetta [22]. Höyrystimeen pumpattavan ja siellä höyrystyvän kylmäaineen suhteesta käytetään termiä kiertoluku. Kiertoluvun suuruus vaihtelee höyrystintehosta riippuen, ja esimerkiksi tekojääratojen tyylisissä kylmäkoneistoissa se on noin 1,2–1,5. [1, s. 189.]

Painovoimakiertoisessa eli termosifonihöyrystimessä (kuva 5) kylmäaineen kierto höyrystimessä toteutetaan syötettävän nestemäisen kylmäaineen ja höyrystimeltä lähtevän neste-höyryseoksen tiheyseron avulla. Syöttämällä kylmäaine höyrystimen alapäästä saadaan aikaan tehokkaampi kuplakiehumisen sekä kylmäainevirtaus [22]. Nestesäiliöstä höyrystimelle tulevan nestepatsaan aiheuttaman paineen on oltava suurempi kuin

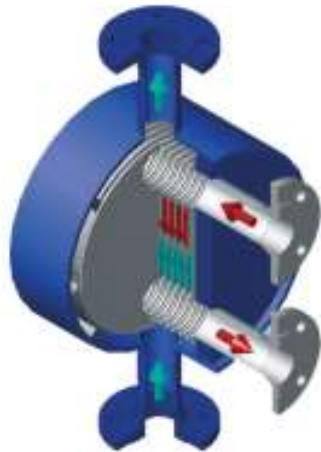
höyrystimeltä lähtevän neste-höyryseoksen paine ja putkiston virtauspainehäviö yhteensä. Näin voidaan varmistua kylmäaineen kierrosta höyrystimelle. Höyrystimeltä nouseva neste-höyryseos ohjataan takaisin nestesäiliöön, jossa nestepisarat erottuvat kaasusta ja jäävät nestekiertoön kaasun noustessa kompressorin imuputkeen. [1, s. 191.]

Nestettä jäähdyttävien höyrystimien valintaan vaikuttaa myös höyrystintyyppi. Vaihtoehtoja on levylämmönsiirrin, moniputkihöyrystin (kuva 6) tai näiden yhdistelmä kuori-levylämmönsiirrin (kuva 7) [2, s. 183]. Levylämmönsiirtimessä lämpö siirtyy kylmäliuoksesta kylmäaineeseen lämpöä hyvin johtavien levyjen avulla, kun taas moniputkihöyrystimessä lämpö siirtyy suuremman putken nestetilassa kulkevien pienempien putkien väliin. Levylämmönvaihtimien suurin etu moniputkihöyrystimeen on pienempi nestetilavuus, jolloin koko kylmäkoneiston täytös pienenee. Lämmönsiirto on myös tehokkaampaa levyjen välityksellä kuin suoraan putken pinnasta, sillä lämmönsiirtopinta-ala on suurempi. Levylämmönsiirrintä käytettäessä on kuitenkin otettava huomioon levyvälien likaantuminen ja mahdollinen tukkeutuminen kylmäaineen mukana kulkeutuvien epäpuhtauksien myötä. Mahdollinen likaantuminen on hyvä ottaa huomioon mitoituksessa, ja likaantumiskertoimena on yleisesti käytetty arvoa 0,35 [3, s. 112]. Moniputkihöyrystimen etuja on muun muassa, että erillistä nestesäiliötä ei välttämättä tarvita järjestelmässä. Höyrystimen vaippapuoli toimii nestesäiliönä. Pisanerotus on kuitenkin mahdollistettava höyrystimen sisällä ennen kompressorin imuputkea. [2, s. 179–183]



Kuva 6. Alfa-Laval Oy:n moniputkihöyrystin (takana) ja levylämmönvaihdin (edessä) [19].

Kuori-levylämmönsiirrin (kuva 7) vastaa rakenteeltaan hyvin paljon moniputkihöyrstintä. Sylinterinmallisen vaipan sisällä on lämmönsiirtolevyjä, joiden pinnan yli lämpö siirtyy liuoksesta kylmäaineeseen tehokkaasti. Tällaisen höyrystimen etuna on hyvä lämmönsiirto sekä höyrystimen mahdollisuus toimia nestesäiliönä kuten moniputkihöyrstin. Kookonsa puolesta kuori-levylämmönsiirtimet ovat huomattavasti kookkaampia verrattuna perinteisiin levylämmönsiirtimiin. [2, s. 183.]











Kuva 7. Vahterus Oy:n kuori-levylämmönsiirrin [20].

### 2.3 Kylmäaine

Alati tiukentuvat kylmäaineiden käytön rajoitteet eivät juurikaan tule vaikuttamaan teollisen kylmän laitoksiin, sillä yleisimmin käytössä olevat ammoniakki (R717) ja hiilidioksidi (R744) ovat hyvin matalan ODP- ja GWP-arvon omaavia kylmäaineita [5]. Kuvassa 8 on esitetty tulevaisuuden näkymiä kylmäaineiden käytössä läpi kylmätekniiikan.



Applications Industries	Present	Short term Up to 2022	Long term 2022-203	
Industrial 	R717 R744	R717 R744	R717 R744	
Centralised systems, Supermarkets 	R134a R404A R744	R134a R448A/R449A R513A R744	R744 HFO Blends R290	
Condensing units 	R134a R404A R407A/F	R134a R513A R407A/F R448A/R449A R450A R452A	HFO blends R744 R290	
Self contained units 	R134a R290 R404A R600a R744	R134a R290 R407A/F R448A/R449A R513A R600a	R290 R600a R744	

Kuva 8. Nykyisten käytössä olevien ja tulevaisuuden vaihtoehtoisten kylmäaineiden vertailu [5].

Esimerkiksi kaupan kylmässä sekä ilmanvaihdon jäähdytyksessä F-kaasuasetus, Kyoton ja Montrealin sopimukset kieltävät usean kylmäaineen käytön lähitulevaisuudessa.

Ammoniakki on vanhimpia käytössä olevia kylmäaineita. Ammoniakkia on käytetty jo 1800-luvulta lähtien [2, s. 122]. Nykypäivänä sen käyttö rajoittuu lähinnä suuriin teollisen kylmän laitoksiin suuren höyrystyslämmön ja volymetrinen kylmäntuoton ansiosta [1, s. 26]. Tekojäiden kylmäkoneistoissa ammoniakki on käytännössä ainoa yleisesti käytössä oleva kylmäaine. Ammoniakin aineominaisuudet rajoittavat kuitenkin sen käyttöä yleisesti kylmäteknikassa. Se on ensimmäisen luokan palava neste ja myrkykky, joka aiheuttaa rajoituksia ja haasteita koneiston sijoitukselle ja konehuonetiloille [1, s. 26–27].

Kylmäaineena ammoniakki on erittäin hyvä aineominaisuuksiensa vuoksi. Suuren lämmönjohtavuuden ansiosta sen lämmönsiirto-ominaisuudet sekä höyrystymisessä että lauhtumisessa ovat hyvät. Matalat GWP- ja ODP-arvot mahdollistavat ammoniakin käytön kylmäaineena myös tulevaisuudessa alati tiukentuvasta lainsäädännöstä huolimatta. Pienen viskositeetin ansiosta putkiston ja putkisto-osien painehäviöt pysyvät matalina.

Ammoniakin höyrystymislämpö on erittäin suuri verrattuna muihin perinteisiin kylmäaineisiin. Suuri höyrystymislämpö mahdollistaa pienet putkikoot koko järjestelmässä, sillä tarvittava kylmäaineen massavirta on pieni. Ammoniakin tilavuustuotto on suuri, jonka johdosta kompressorikoot järjestelmissä pysyvät pieninä. [2, s. 122–123.]

Pienten putkidimensioiden, kompressorikokojen, sekä välillisten järjestelmien pienen tarvittavan kylmäainetäytöksen ansiosta kylmäkoneiston hankintakustannukset pysyvät edullisina. Ammoniakki aineena on myös edullista. [2, s. 123.]

Ammoniakin myrkyllisyys hengitettynä, syövyttävyys kudoksilla sekä mahdollisuus muodostaa räjähtäviä seoksia ilman kanssa vaativat tarkkuutta ja huolellisuutta kylmälaitosta suunniteltaessa, rakennettaessa ja käytettäessä. Ammoniakkiseoksen räjähdys on kuitenkin mahdollista vain erittäin harvinaisissa olosuhteissa, eikä siksi ole suuri riski. [1 s. 26–27.] Eri ammoniakkipitoisuuksien vaikutuksia kehoon on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ammoniakin pitoisuuksien vaikutukset konehuonetilan ilmassa [5].

Pitoisuus (ppm)	Vaikutus
5...10	Voidaan havaita
100	Ei välttämättä haittaa kokeneita kylmähenkilöitä
150...200	Ärsyttää limakalvoja ja silmiä
500...700	Silmät "vuotaa" noin 30 sekunnissa, mutta voi vielä hengittää
1000	Hengittäminen sietämätöntä, silmien mahdollinen pysyvä vaurioituminen
1500	Voi vaurioittaa kudoksia
2500...	Voi lisätä kuolemanriskiä

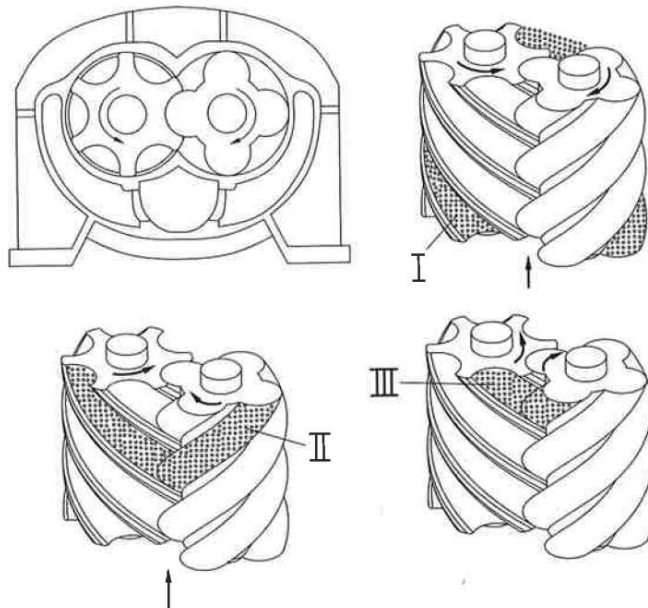
Veden liukenevuus ammoniakkiin on suurta, jonka vuoksi kylmälaitoksen pitää olla erittäin tiivis. Suurin sallittu vesipitoisuus ammoniakkijärjestelmässä on 0,1 % [2, s. 123]. Veden liiallinen liukeneminen kylmäaineputkistoon aiheuttaa lämmönsiirto-ominaisuuksien heikkenemistä, putkisto-osien syöpymistä ja voi lopulta johtaa kompressorin hajoamiseen [1, s. 27].

## 2.4 Kompressorit

Suuren kylmätehon teollisen kylmän laitoksissa hallitsevia kompressorityyppejä ovat yleisesti olleet ruuvikompressorit sekä yksi- tai kaksiasteiset avomäntäkompressorit. Vaikka ruuvikompressoreiden hyötysuhde pienillä osatehoilla on huono, on se kuitenkin ollut yleisemmin käytetty kuin mäntäkompressorit niiden korkeamman painesuhteen, portaattoman tehonsäädön ja pitkien huoltovälien ansiosta. Korkean painesuhteen mahdollistaa ruuvikompressorin ruiskutettava öljy, joka jäähdyttää kylmäainehöyryä. [1, s. 195.] Öljyn ruiskutuksesta on muitakin hyötyjä. Öljykalvo kompressorin roottoreiden välissä toimii tiivisteenä, jonka ansiosta vuodot pienenevät ja kierrosnopeutta voidaan tapauskohtaisesti alentaa. Myös laakerit, akselitiivisteet, säätöluistin siirto ja mahdollisesti imuventtiilin ohjaus tarvitsevat öljyä toimiakseen. Haittapuolena öljyruiskutuksesta on suuren öljymäärän poistuminen kompressorista kylmäaineen mukana. Tämän vuoksi ruuvikompressorilaitteistossa on oltava hyvin tehokas öljynerotus sekä -palautusjärjestelmä, erityisesti ammoniakkijärjestelmissä, sillä ammoniakki ei liukene useimpiin öljy-laatuihin. Öljyä joudutaan myös jäähdyttämään erotuksen parantamiseksi. [2 s. 160–161.] Öljyn määrän koneistossa on oltava suuri, jolloin öljysäiliöt ovat suuria. Öljynerotin ja säiliö voivat olla erillään tai yhdistettynä. [1, s. 196.]

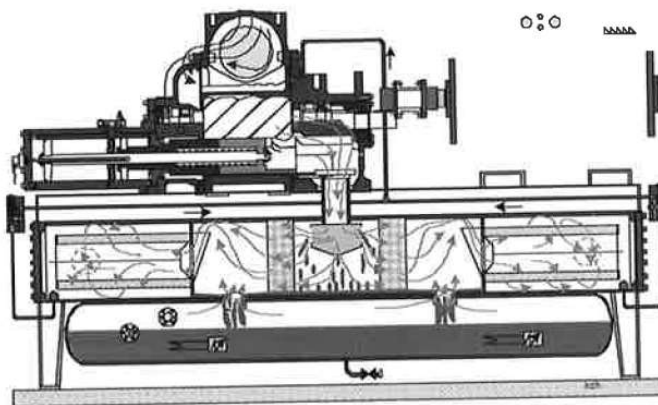
Avoruuvikompressorin (kuvat 9 ja 10) muodostuu seuraavista osista:

- kompressorit
- sähkömoottori
- öljynerotin
- öljysäiliö.



Kuva 9. Kaksiroottorisen ruuvikompressorin toimintaperiaate. 1 puristustila täyttyy, 2 puristus ja 3 höyryn poisto. [2, s. 158.]

Ruuvien pyöriessä toisiaan vastaan jää ruuvien ja kompressorin kuorien väliin puristustila, joka etenee ruuvien pyöriessä. Puristustila myös pienenee edetessään. Hyvän hyötysuhteen saavuttamiseksi ruuvit ovat epäsymmetrisiä poikkileikkaukseltaan. [2, s. 157.]



Kuva 10. Ruuvikompressorin leikkauskuva [1, s. 196].

Öljyjärjestelmä on huomattavasti monimutkaisempi ruuvikompressoreissa, etenkin ammoniakikäytössä, kuin esimerkiksi mäntäkompressoreissa. Pääkomponentit öljyjärjestelmässä ovat

- öljynerotin
- öljypumppu
- öljysäiliö/öljynjäähdytin
- öljysuodatin
- säätimet
- öljykanavistot ja ruiskutussuuttimet. [2, s. 161.]

Öljypumppu voidaan myös korvata kompressorin tuottamalla paine-erolla, jonka avulla öljy saadaan ruiskutettua kompressorin puristustilaan. Tämä menetelmä vaatii riittävän lauhtumispaineen öljyn ruiskutuksen varmistamiseksi sekä käynnistystilannetta varten pienen apupumpun. [2, s. 161.]

Öljynjäähdytys voidaan toteuttaa kolmella tavalla. Termosifonisessa jäähdytyksessä öljynerottimelta menevä öljy jäähdytetään erillisessä öljynjäähdyttimessä nestesäiliöstä tulevalla kylmäaineella ennen kompressorin. Kylmäaine johdetaan öljynjäähdyttimeltä paineputkeen ennen lauhtutinta. [1, s. 196–197.]

Öljynjäähdytyksessä nesteenä voidaan käyttää esimerkiksi vettä, jonka virtausta jäähdyttimeen ohjataan kompressorille menevän öljyn lämpötilan mukaan. Öljyn jäähdyttämiseen käytetty teho voidaan tällöin vähentää lauhtutintehosta. Nesteellä jäähdyttämisen etuna on mahdollisuus järjestää lämmöntalteenotto öljynjäähdyttimestä. [1, s. 197.] Suuren kokoluokan kylmäkoneistoissa öljynjäähdyttimen tehot voivat olla hyvinkin suuria, ja hukkalämmön hyödyntäminen esimerkiksi tekojäakohteissa olisi hyödyllistä [9].

Öljynjäähdytys voidaan myös toteuttaa matalapainekompressoreissa ruiskuttamalla nestemäistä kylmäainetta kompressorin puristustilaan. Tämä menetelmä heikentää kompressorin kylmätehoa eli hyötysuhde heikkenee. Menetelmä on käytössä oikeastaan sen edullisten hankintakustannuksien takia. [1, s. 197.]

Ruuvikompressoreiden tehonsäätö voidaan tehdä joko luistitehonsäätönä tai kompressorin pyörimisnopeuden säädöllä. Ruuvin alla sijaitsevan kaksiosaisen luistin osia voidaan liikuttaa toisiinsa nähden. Haluttaessa pienentää kompressorin tehoa avataan luistien välinen rako, jolloin osa kylmäainehöyrystä pääsee palaamaan takaisin imupuolelle. Kun tilavuus- ja painesuhdetta halutaan pienentää, liikutetaan luisteja siten, että höyry pääsee purkautumaan puristustilasta aiemmin. Haluttaessa kasvattaa suhteita liikutetaan luisteja siten, että ruuvit puristavat kylmäainehöyryn korkeampaan paineeseen ennen purkautumista. Säättämällä pyörimisnopeutta portaattomasti esimerkiksi taajuusmuuttajalla saadaan hyötysuhteet pidettyä parempina myös osatehoilla kuin luistitehonsäädöllä. [1, s. 196.]

Kompressorin valinta on yleensä turvallisinta suorittaa laitevalmistajien mitoitusohjelmistojen avulla. Tällöin voidaan käyttää todellisia käyntiolosuhteita ja varmistua laitoksen toiminnasta. Öljynjäähdytysjärjestelmää mitoittaessa tulee käyttää mitoitusarvoina äärimmäisiä olosuhteita. [1, s. 197.] Tämän työn kompressoreiden esimerkkituloituksessa on käytetty saksalaisen kompressorivalmistaja Bitzerin mitoitus- ja valintaohjelmaa (Bitzer Software v6.9.1 rev2074).

## 2.5 Putkisto

Ammoniakkikylmäkoneiden putkistomateriaalina on käytettävä terästä. Yleisesti kylmäjärjestelmissä käytetty kupari ei sovellu putkimateriaaliksi, sillä ammoniakiin vahvasti liukeneva kosteus syövyttää kupariputkistoa [1, s. 27]. Putkiston liitostapana tulee käyttää hitsausliitoksia, näin varmistetaan tarvittava tiiveys ammoniakkin käyttöturvallisuuden ja järjestelmän toiminnallisuuden varmistamiseksi. Järjestelmän tiiveys tulee olla paineastiasäädösten mukainen.

Kylmäkoneiston putkistomitoituksen perusteina ovat virtausnopeus ja putkiston painehäviöt. Painehäviöt tulee pitää mahdollisimman pieninä, kuitenkin komponenttien hankintakustannuksiltaan kohtuullisina. Öljyn palautus tulee taata kompressorille putkidimensioita valittaessa. Tehosäädetyissä koneistoissa täytyy nämä vaatimukset täyttyä myös pienimmällä käytettävällä osateholla. Virtausnopeuksille on esitetty TalotekniikkaRYL 2002:n osassa G4 virtausnopeuksille ja painehäviöille taulukoiden 3 ja 4 mukaiset raja-arvot [5, s. 181–182]

Taulukko 3. Virtausnopeuksien ohjeellisia arvoja.

Ohjeelliset virtausnopeudet		
Imuputki	8...40	m/s
Nesteputki	0,5...1,0	m/s
Paineputki	10...30	m/s
Lauhdeputki	0,2...1,0	m/s

Taulukko 4. Painehäviöiden ohjeellisia arvoja ammoniakkijärjestelmissä.

Taloudellisiksi todetut painehäviöt NH <sub>3</sub>		
Imuputki	0,5	K
Nesteputki	0,5	K
Paineputki	0,5	K
Lauhdeputki	0,5	K

Kylmälaitoksen putkiston painehäviöt ilmoitetaan sitä vastaavana lämpötilan muutoksena kyllästysalueella (K tai °C).

Kirjallisuudessa on paljon eroavaisuuksia mitoitusperusteissa, ja Esko Kaappolan luentomateriaaleihin on kerätty hieman eroavia virtausnopeuksia. Näitä (taulukko 5) on käytetty putkiston mitoituksessa esimerkkikohteen laskennassa [5].

Taulukko 5. Mitoitusperusteiset virtausnopeudet.

Mitoituksessa käytetyt virtausnopeudet		
Imuputki	10...25	m/s
Nesteputki	alle 1	m/s
Paineputki	5...15	m/s
Lauhdeputki	alle 0,5	m/s

Virtausnopeuden selvittämiseksi täytyy olla tiedossa laitoksen massavirta, joka saadaan laitoksen höyrystintehon yhtälöstä 3 [1, s. 202].

$$\Phi_h = q_m * \Delta h_h \quad (3)$$

$\Phi_h$  on höyrystimen kylmäteho (kW)

$q_m$  on virtaavan aineen massavirta (kg/s)

$\Delta h_h$  on entalpiaero höyrystimessä (kJ/kgK)

Virtausnopeus saadaan selvitettyä yhtälöllä 4 [1, s. 202].

$$v = \frac{\frac{4}{\pi} * q_m * v_1}{d^2} \quad (4)$$

$q_m$  on virtaavan aineen massavirta (kg/s)

$v_1$  on kylmäaineen ominaistilavuus (m<sup>3</sup>/kg)

$d$  on putken sisähalkaisija

Tiedot, kuten höyrystimen entalpiaero ja kylmäaineen ominaistilavuus saadaan piirtämällä kylmäprosessi R717 log p,h-tilapiirrokseseen (liite 1). Teräsputken dimensiotietoina (taulukko 6) on käytetty hitsattavan teräsputken dimensioita [1, s. 203].



Taulukko 6. Hitsattavan teräsputken dimensiot [1, s. 203].

**Saumaton hitsattava teräsputki**

DN	d <sub>u</sub> [mm]	seinämä [mm]	d <sub>s</sub> [mm]	d <sub>s</sub> [m]
10	17,2	2	13,2	0,0132
15	21,3	2,3	16,7	0,0167
20	26,9	2,6	21,7	0,0217
25	33,7	2,6	28,5	0,0285
32	42,4	2,6	37,2	0,0372
40	48,3	2,6	43,1	0,0431
50	60,3	2,9	54,5	0,0545
70	76,1	2,9	70,3	0,0703
80	88,9	3,2	82,5	0,0825
100	114,3	3,6	107,1	0,1071
125	139,7	4	131,7	0,1317
150	168,3	4,5	159,3	0,1593
200	219,1	5,9	207,3	0,2073
250	273	6,3	260,4	0,2604
300	323,9	7,1	309,7	0,3097
350	355,6	8	339,6	0,3396
400	406,4	8,8	388,8	0,3888
500	508	11	486	0,486

Putkiston painehäviöitä voidaan tarkastella yhtälöllä 5 [6].

$$\Delta p_{\lambda} = \lambda * \frac{l}{d_s} * \frac{1}{2} * \rho v^2 \quad (5)$$

$\Delta p_{\lambda}$  on suoran putken kitkavastusten aiheuttama painehäviö (Pa)

$\lambda$  on kitkavastuskerroin

$l$  on putken pituus (m)

$d_s$  on putken sisähalkaisija

$\rho$  on virtaavan aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  on virtaavan aineen nopeus (m/s)

Kitkavastuskerroin riippuu virtauksen luonteesta ja turbulentsissa virtauksessa putken suhteellisesta karheudesta. Eri putkien karheuteen eli k-arvoon vaikuttaa putken materiaali. Yleisesti voidaan käyttää putkimateriaalista riippuen taulukon 7 mukaisia arvoja:

Taulukko 7. Eri putkimateriaalien k-arvoja [6].

Putkityyppi	k-arvo (mm)
Sileät vedetyt putket esim. kupari, lasi..	0 – 0,0015
Teräsputki, valssattu	0,01 – 0,05
Teräsputki, sinkitty	0,1 – 0,16
Muoviputket	0,0015 – 0,007

Suhteellinen karheus on k-arvon suhde putken sisähalkaisijaan (k/d) millimetreinä. Tämän lisäksi turbulentsissa virtauksessa kitkavastuskertoimen suuruuteen vaikuttaa Reynoldsin luku (yhtälö 6). [6]

$$Re = \frac{d_h \cdot v}{\nu} \quad (6)$$

Re on Reynoldsin luku (dimensioton)

$d_h$  on putken sisähalkaisija (m)

$v$  on virtausnopeus (m/s)

$\nu$  on kinemaattinen viskositeetti

Kinemaattinen viskositeetti saadaan jakamalla aineen dynaaminen viskositeetti aineen tiheydellä (yhtälö 7) [6].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (7)$$

$\eta$  on aineen dynaaminen viskositeetti (Pa\*s)

$\rho$  on aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

Dynaamisen viskositeetin arvona voidaan ammoniakille käyttää taulukon 8 mukaisia arvoja [7].

Taulukko 8. Ammoniakin dynaaminen viskositeetti eri lämpötiloissa [7].

Dynaaminen viskositeetti NH <sub>3</sub>	cP (=0,001 Pa s)
Kaasu	0,01
Neste (27°C)	0,1293
Neste (-33,5°C)	0,255

Laminaarisen virtauksen kitkavastuskerroin lasketaan yhtälön 8 mukaisesti [6].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (8)$$

LVI-tekniikassa käytetään turbulenttisen kitkavastuskertoimen määrittämiseen yleisesti Prandtl-Colebrookin yhtälöä 9. [6].

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg\left[\frac{2,51}{Re*\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71d}\right] \quad (9)$$

$\lambda$  on kitkavastuskerroin

Re on Reynoldsin luku

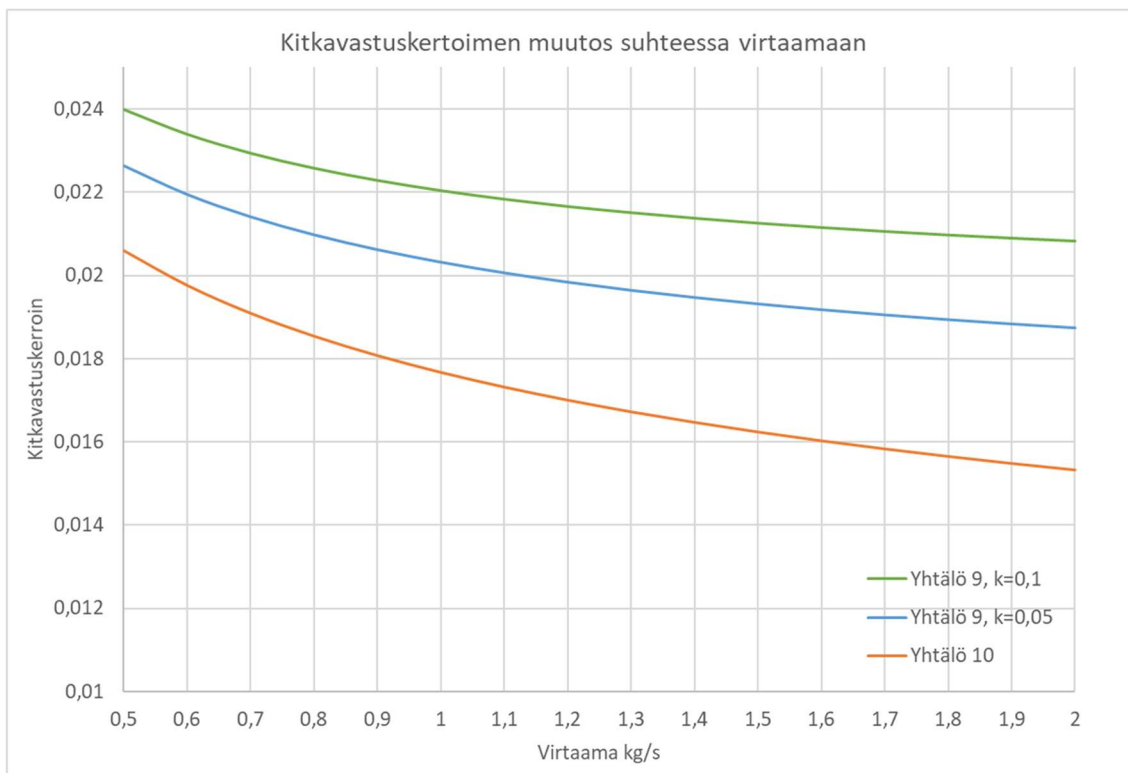
k on karheuskerroin (mm)

d on putken sisähalkaisija (mm)

Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskerroin voidaan vaihtoehtoisesti määrittää myös yhtälöllä 10 [3, s. 31].

$$\lambda = [1,84 \log(Re) - 1,64]^{-2} \quad (10)$$

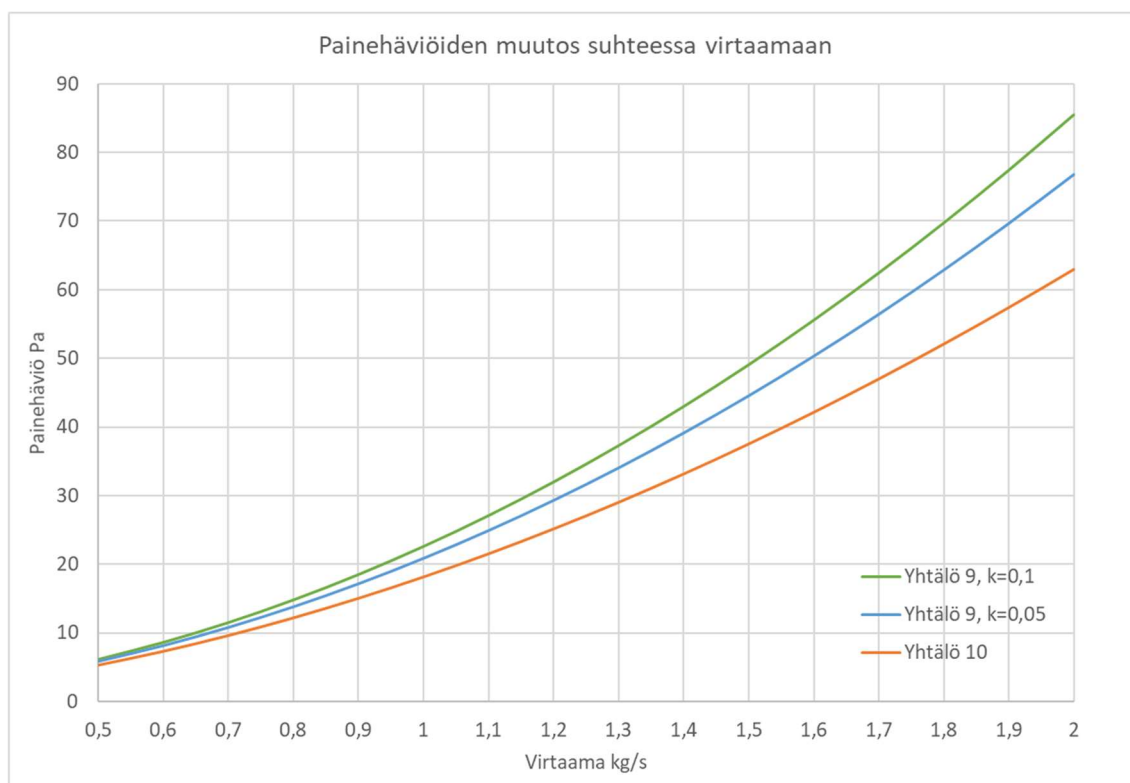
Kuvassa 11 on vertailtu yhtälöillä 9 ja 10 selvitettyjä kitkavastuskertoimien arvoja. Yhtälön 9 kertoimia on myös vertailtu keskenään putken karheutta kasvatettaessa. Vertailussa on käytetty esimerkkikohteen ammoniakkin aineominaisuuksia DN100-teräsputkessa eri virtaamilla laitoksen nesteputkessa lämpötilassa 25 °C.



Kuva 11. Kitkavastuskertoimien vertailu eri virtaamilla nesteputkessa.

Kuvaajasta voidaan todeta yhtälön 9 kitkavastuskertoimien olevan suurempia kuin yhtälöllä 10 kertoimet. Virtaaman kasvaessa suurenee myös ero eri yhtälöillä saavutetuissa kertoimissa. Yhtälö 10 ei ota huomioon putken karheuden aiheuttamaa virtausvastusta. Yhtälössä 9 putken karheutta kasvatettaessa kasvaa myös kitkavastuskerroin. Kitkavastuskertoimen suuruus näkyy suoraan sen avulla lasketuissa painehäviöissä, jolloin yhtälöllä 9 lasketut painehäviöt ovat virtaaman kasvaessa huomattavasti suurempia kuin yhtälön 10 arvot (kuva 12).

Kitkavastuskertoimien laskennassa ei ole kokonaispainehäviöiden kannalta suurta merkitystä käytettäessä hydraulisesti sileitä putkimateriaaleja. Käytettäessä karheampia putkimateriaaleja on karheuden luoman virtausvastuksen merkitys kuitenkin hyvä ottaa huomioon putkiston kokonaispainehäviöitä laskettaessa.



Kuva 12. Painehäviöiden vertailu eri virtaamilla nesteputkessa.

Painehäviöitä laskettaessa on otettava huomioon putkiston kitkapainehäviöiden lisäksi myös korkeuseroista syntyvät staattiset painehäviöt. Korkeuseron aiheuttama painehäviö voi nesteputkessa aiheuttaa kylmäaineen höyrystymistä ennen höyrystintä [1, s. 54]. Myös venttiilien ja muiden putkistokomponenttien tuoma painehäviö tulee ottaa huomioon laskennassa. Imuputken painehäviön kasvaessa täytyy kompressorin toimia pienemmällä imupaineella, joka näkyy kompressorin ottotehossa. Tästä johtuen käytetään imu- ja paineputken mitoitusperusteena painehäviöitä, kun taas neste- ja lauhdeputket voidaan mitoittaa virtausnopeuden perusteella. Imuputki mitoitetaan yleensä siten, että virtauksen aiheuttama painehäviö on noin 1–1,2 K ja paineputkessa 0,5–1,2 K [7].

Putkiston mitoitus käsin on yleensä hyvin työlästä, ja siihen on olemassa useita eri valmistajien mitoitusohjelmistoja. Tämän työn esimerkkiputkimitoituksessa ja laskelmien tarkastuksessa on käytetty Danfoss Oy:n CoolSelector<sup>®</sup> 2 -komponentti- ja putkimitoitusohjelmistoa.

## 2.6 Lauhdutin

Kun korkeapaineinen kylmäainehöyry on kosketuksissa kyllästyslämpötilaa alhaisemman pinnan kanssa, alkaa höyryä lauhtua lämmönsiirtopinnoille. Tähän peruseriaatteen perustuu lauhtuttimen toiminta. Tämä toiminta voidaan jakaa kahteen lauhtumistyyppiin; pisara- ja kalvolauhtuminen. Pisaralauhtumisessa kylmäainehöyry nesteytyy pisaroiksi lämmönsiirtopinnoille ja valuu alaspäin. Valumisesta johtuen lämmönsiirtopintaa paljastuu jatkuvasti lisää, jolloin lämmönsiirtyminen on tehokasta. Pisaralauhtumiselle tarvittavat olosuhteet ovat kuitenkin hyvin harvinaisia, jolloin lauhtuminen tapahtuu kalvolauhtumisena. Kalvolauhtumisessa kylmäainehöyry nesteytyy kalvoksi lämmönsiirtopinnalle. Nestekalvo toimii eristeenä pinnalla, jolloin se huonontaa lämmön siirtymistä. Kalvon muotoon ja paksuuteen vaikuttaa esimerkiksi pinnan muoto ja asento. Ohuen kalvon virtaus on yleensä laminaarista, mutta kalvon paksuuntuessa voi virtaus muuttua myös turbulenttiseksi. Putkiryhmässä nestekalvot valuvat alaspäin, jolloin alempiin putkiin kertyy paksumpi kalvo joka hidastaa lämmönsiirtymistä. Nestepisaroiden valuminen aiheuttaa kuitenkin turbulenssia kalvoissa, jolloin lämmönsiirto paranee. [2, s. 200.]

Moniputki- tai koaksaalilauhduttimen vaatimaa putkimäärää voidaan selvittää yhtälöllä 11 [2, s. 204].

$$L = \frac{\Phi_l \cdot R'}{\Delta T_{ln}} \quad (11)$$

$\Phi_l$  on lauhdutinteho (W)

$R'$  on putken pituusyksikön vastus (Km/W)

$\Delta T_{ln}$  on logaritminen lämpötilaero lauhduttimessa (K)

Putken pituusyksikön vastus  $R'$  saadaan yhtälöllä 12 [2, s. 204].

$$R' = \frac{1}{\pi d_s \alpha_1} + \frac{1}{\pi d_u \alpha_2} \quad (12)$$

$d_s$  on putken sisähalkaisija (mm)

$d_u$  on putken ulkohalkaisija (mm)

$\alpha_1$  on sisäpuolen lämmönsiirtymiskerroin (W/Km<sup>2</sup>)

$\alpha_2$  on ulkopuolen lämmönsiirtymiskerroin (W/Km<sup>2</sup>)

Lauhtumistehon yhtälöllä 13 voidaan arvioida tarvittavaa lämmönsiirtopinta-alaa.

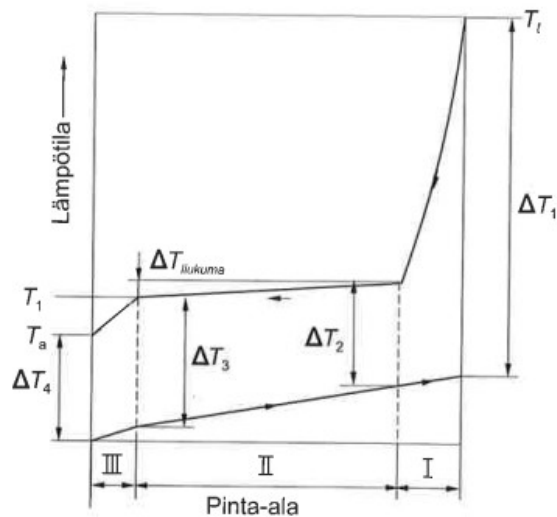
$$\phi_l = U_l A_l \Delta T_{ln} \quad (13)$$

$U_l$  on lauhtumisosan lämmönläpäisykerroin (W/Km<sup>2</sup>)

$A_l$  on lauhtumisosan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

Logaritminen lämpötilaero lasketaan yhtälöllä 14 [2, s. 203].

$$\Delta T_{ln} = \frac{\Delta T_3 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_2}\right)} \quad (14)$$



Kuva 13. Lämpötilojen muutokset lauhttimessa vastavirtauksessa (I tulistuksen jäähtyminen, II lauhtuminen, III alijäähtyminen) [2, s. 203].

Taulukko 9. Eri lauhdutintyyppien U-arvojen suuruusluokkia jäähdyttävänä väliaineena käytet-  
täessä vettä [2, s. 204].

Rakenne	Jäähdyttävä väliaine	U W/Km <sup>2</sup>
Koaksaalilauhdutin, halogeenivedyt	Vesi	500...1500
Moniputkilauhdutin, sileät putket -ammoniakki	Vesi	1000...1500
-halogeenihiilivedyt		700...1000
Levylämmönsiirrin	Vesi	2000...3000
Moniputkilauhdutin, rivotetut putket -ammoniakki	Vesi	1500...2000
-halogeenihiilivedyt		1000...1500

Lauhdutintyytit vastaavat hyvin pitkälti höyrystimien tyyppejä. Lauhdutintyyteistä yleisimmät suuren kylmätehon laitoksissa ovat koaksaali- ja moniputkilauhduttimet sekä levylämmönsiirtimet. [2, s. 205.]

Koaksaali- eli kaksoisputkilauhduttimen suuremmassa vaippaputkessa virtaa lauhtuva kylmäaine ja sisäputkessa lauhduttava neste. Kylmäaine lauhtuu sisäputken ulkopinnalle kalvoksi ja valuu ulkoputken pohjalle, näin lauhde ei peitä lämmönsiirtopintaa. Sisäputki voidaan varustaa rivotuksella, jolloin lämmönsiirto paranee ja sisäputki saadaan hyvin keskitettyä ulkoputken keskelle. Virtaustyyppi aineiden välillä on aina vastavirtausta. Spiraalinmuotoisia koaksaalilauhduttimia ei suuren kylmätehon laitteistoissa voida käyttää, sillä niiden lauhdutusteho ei ole riittävä. Lauhdutustehon kattamiseksi koaksaaliputkisto on rakennettava suorista putkista, jolloin pituus voi kasvaa hyvinkin suureksi ja hankintakustannukset sekä tilantarve kasvavat. [2, s. 205.]

Moniputkilauhduttimet ovat yleisesti olleet käytössä teollisen kylmän laitoksissa. Rakenteeltaan ne vastaavat moniputkihöyrystimiä. Lauhtuva kylmäaine ohjataan lauhduttimen ulkovaippaan, jonka sisällä kulkee jäähdytysputkistoa. Höyrystynyt korkeapaineinen kylmäaine lauhtuu jäähdytysputkiston pintaan ja valuu ulkovaipan pohjalle. Moniputkilauhduttimen etuna on nestesäiliön tarpeettomuus, jos lauhduttimen ulkovaipan tilavuus on riittävän suuri. Lauhdutin toimii siis myös nestesäiliönä. Kuten moniputkihöyrystimet, voidaan myös moniputkilauhduttimen jäähdytysputkisto varustaa rivotuksella lämmönsiirron parantamiseksi. [2, s. 206.]



Kuten höyrytimenä, levylämmönsiirintä voidaan myös käyttää lauhduttimena. Lämmönsiirto-ominaisuudet ovat levylämmönsiirtimissä erittäin hyviä, esimerkiksi ammoniakkaa jäähdytettäessä vedellä lämmönläpäisykerroin on luokkaa 2 500...4 500 W/Km<sup>2</sup> [2, s. 207]. Ahtaiden levyvälien ja kovien virtausnopeuksien takia levylämmönsiirrin on kuitenkin mitoitettava tarkkaan sen toiminnan varmistamiseksi. Ammoniakkijärjestelmien tiiveysvaatimusten takia levylämmönsiirtimet ovat hitsattuja tai puolihitsattuja, jolloin liikaantuminen ja ahtaat levyvälit vaikeuttavat siirtimen puhdistamista. [2, s. 182.]

## 2.7 Eistäminen

Kylmälaitoksen osien eristäminen on erittäin tärkeää laitoksen oikean toiminnan kannalta. Eistämisellä laitoksen osat oikealla eristetyypillä ja -paksuudella saavutetaan mahdollisimman pieni energiahäviö putkisto-osien ja komponenttien läpi ympäröivään tilaan sekä varmistetaan laitoksen korroosionkestävyys. Kylmälaitoksen eristäminen vaatii tarkempaa huolellisuutta kuin lämpöeristäminen yleisesti, sillä kosteuden pääsyn estäminen kylmien putkien ja komponenttien pinnoille vaatii höyrytiivin eristetyypin, sekä huolellisen eristeasennuksen. Kylmälaitoksen eristäminen voidaan jakaa kolmeen eri eristämistyyppiin, joita ovat taloudellinen eristys, kastepiste/hikoilueristys ja prosessieristys. [1, s. 154.]

Taloudellisessa eristyksessä eristetyypin materiaali ja paksuus valitaan energiahäviöistä johtuvien kustannuksien sekä eristeiden kustannuksien väliltä. Energiahäviöitä voidaan minimoida kasvattamalla eristeiden paksuutta tai valitsemalla tehokkaampi eristemateriaali. Tällöin kuitenkin hankinta- ja asennuskustannukset nousevat, joten eristetyypin optimoidaan kustannuksien ja energiahäviöiden avulla. Prosessieristämisessä sen sijaan eristyksen mitoitavana tekijänä on prosessin kohteen sisällön lämpötilan pysyminen halutussa arvossa. [1, s. 155.]

Yleisin eristetyypin ja paksuuden valintaperuste on kastepiste/hikoilueristäminen. Putkien ja komponenttien pinnat pyritään pitämään kuivina, jottei ilmasta tiivistyvä kosteus pääsisi kondensoitumaan ja jäätyämään pinnoille. Kosteus pinnoilla voi aiheuttaa korroosiota, vahingoittaa eristekerrosta sekä kasvattaa lämmönsiirtokerrointa, jotka ovat haitallisia laitoksen elinkaaren kannalta. Kondenssieristuksen mitoituksen perusteena on

eristeen pintalämpötilan pitäminen ympäröivän ilman kastepistettä korkeampana. Eristepaksuuden määrittävä tekijä on aina kondenssieristys, mikäli taloudellisen eristyksen eristyspaksuus on pienempi. Tasopinna tai säiliön tarvittavaa eristevahvuutta voidaan arvioida yhtälöllä 15. [1, s. 156.]

$$S_F = \frac{\lambda}{\alpha_u} \left( \frac{T_u - T_s}{T_u - T_k} - 1 \right) \quad (15)$$

$S_F$  on tarvittava eristevahvuus (m)

$\lambda$  on eristeen lämmönjohtavuus (W/mK)

$\alpha_u$  on ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$T_u$  on ympäristön lämpötila (°C)

$T_s$  on sisäpinnan lämpötila (°C)

$T_k$  on ulkopinnan kastepisteen lämpötila (°C)

Taulukossa 10 on ilmoitettu yleisimpien eristemateriaalien lämmönjohtavuuksia eri keskilämpötiloilla. Nämä ovat kuitenkin suuntaa antavia arvoja, ja todelliset lämmönjohtavuudet tulee aina tarkastaa materiaalivalmistajalta. [1, s. 155.]

Taulukko 10. Eristeiden lämmönjohtavuuksia [1, s. 155].

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

Putken eristepaksuutta voidaan arvioida putken lämpöhäviön yhtälön avulla (yhtälö 16) [3, s. 94].

$$\Phi_p = \frac{\pi(t_u - t_s)}{\frac{1}{\alpha_s d_s} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_u}{d_s} + \frac{1}{\alpha_u d_{ue}}} \quad (16)$$

$\Phi_p$  on putken lämpöhäviö (W/m)

$t_s$  on eristetyn kohteen sisälämpötila (°C)

$t_u$  on ulkolämpötila

$\lambda$  on eristeen lämmönjohtavuus (W/mK)

$\alpha_s$  on sisäpuolen lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$\alpha_u$  on ulkopuolen lämmönsiirtokerroin (W/m<sup>2</sup>K)

$d_s$  on eristeen/putken sisähalkaisija (m)

$d_u$  on eristeen/putken ulkohalkaisija (m)

$d_{ue}$  on eristeen ulkohalkaisija (m)

$d_{se}$  on eristeen sisähalkaisija (m)

Yhtälössä 16 mainittu sisäpuolen lämmönsiirtokerroin  $\alpha_s$  voidaan nestemäisessä putki-  
virtauksessa jättää huomiotta, sillä sen lämmönvastus ei vaikuta lämmön siirtymiseen.  
Tällöin yhtälö voidaan esittää muodossa [3, s. 95]:

$$\phi_p = \frac{\pi(t_u - t_s)}{\frac{1}{2\lambda e} \ln\left(\frac{d_{ue}}{d_{se}}\right) + \frac{1}{\alpha_u d_{ue}}} \quad (17)$$

Höyryputken sisäpuolen lämmönsiirtokerroin saadaan yhtälöstä 18 [3, s. 94].

$$\alpha_s = \frac{Nu\lambda}{d_s} \quad (18)$$

Yhtälössä ilmenevä Nu on Nusseltin luku, joka saadaan turbulenttiselle virtaukselle yh-  
tälöistä 19 ja 20 [3, s. 94].

lämpenevä virtaus:

$$Nu = 0,0243 * Re^{0,8} * Pr^{0,4} \quad (19)$$

jäähtävä virtaus:

$$Nu = 0,0265 * Re^{0,8} * Pr^{0,3} \quad (20)$$

Pr on Prandtlin luku, joka saadaan yhtälöstä 21 [3, s. 96].

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{\lambda} \quad (21)$$

$c_p$  on virtausaineen ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)

$\mu$  on virtausaineen dynaaminen viskositeetti (Pa\*s = kg/ms)

$\lambda$  on lämmönjohtavuus (W/mK)

Nusseltin luku laminaariselle putkivirtaukselle saadaan yhtälöstä 22 [3, s. 95].

$$Nu = 3,66 + \frac{0,19 * \left(\frac{Pe * d_s}{l}\right)^{0,8}}{\left(1 + 0,0117 * \frac{Pe * d_s}{l}\right)^{0,467}} \quad (22)$$

$$Pe = \frac{v d_s \rho c_p}{\lambda} \quad (23)$$

$v$  on virtausnopeus (m/s)

$d_s$  putken sisähalkaisija (m)

$\rho$  on virtausaineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)

$c_p$  on virtausaineen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)

$\lambda$  on lämmönjohtavuus (W/mK)

Putken lämpöhäviön yhtälössä esiintyvä ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin muodostuu säteilyn ja konvektion lämmönsiirtokertoimesta (yhtälö 24) [3, s. 95].

$$\alpha_u = \alpha_{sät} + \alpha_k \quad (24)$$

$$\alpha_{sät} = \varepsilon \sigma \frac{(T_u^4 - T_e^4)}{T_u - T_e} \quad (25)$$

$\varepsilon$  on eristeen emissiviteetti (dimensioton)

$\sigma$  on Stefan-Boltsmanin vakio (5,67\*10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

$T_u$  on ulkoilman lämpötila (K)

$T_e$  on eristeen pintalämpötila (K)

Konvektion lämmönsiirtokerroin saadaan yhtälöllä 26 [3, s. 96].

$$\alpha_k = \frac{Nu_i}{x} \quad (26)$$

$Nu$  on Nusseltin luku

$\lambda$  ympäröivän ilman lämmönjohtavuus (W/mK)

$x$  on putken ulkohalkaisija (m)

Yhtälössä 26 mainittu Nusseltin luku saadaan yhtälöstä 27 [3, s. 96].

$$Nu = \left[ 0,6 + \frac{0,387 Ra_d^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{27}}}\right] \quad (27)$$

$Ra$  on Rayleighin luku, joka saadaan ratkaistua yhtälöllä 28 [3, s. 96].

$$Ra = \frac{9,81\beta\Delta T}{\frac{\lambda}{\rho c_p} \nu} \quad (28)$$

$\beta$  on kaasun tilavuuden lämpötilakerroin (1/T)

$\nu$  on kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s)

$\mu$  on dynaaminen viskositeetti (Pa\*s)

$T$  on lämpötila (K)

Eristeen pintalämpötilaa tarvitaan putken lämmönsiirtokertoimien määrittelyssä, ja se saadaan yhtälöllä 29 [3, s. 97].

$$T_e = T_u + \frac{\phi_p}{\pi\alpha_u d_{ue}} \quad (29)$$

Putken lämpöhäviön (yhtälö 16) ja eristeen pintalämpötilan (yhtälö 29) avulla voidaan iteroimalla selvittää eristeen pintalämpötila arvaamalla pinnan lämpötilaksi eri arvoja, kunnes lämpöhäviöt saadaan tavoiteltuun arvoon [3, s. 97].

Suurissa kylmlaitoksissa yleisimmin käytetty eristemateriaali on solukumi, sillä se ei tarvitse rakenteensa ansiosta erillistä höyrysulkua. Jos solukumieristeen UV-säteilyn tai fyysisen rasituksen kestoja halutaan parantaa, eriste voidaan myös pintamaalata tai varustaa muovi- tai metallipäällysteellä. Solukumieristeen saumasaineena käytetään materiaalille soveltuvaa liimaa. Saumojen tiivistyksessä tulee olla erittäin huolellinen, ettei

eristeeseen synny kylmäsiltoja. [1, s. 155.] Laitoksen komponenttien, kuten höyrystimien huoltokilpiä ei saa eristää piiloon, jotta niitä voidaan tarkastella eristettä purkamatta. Putkisto-osat, kuten venttiilit ja pumput, tulee eristää kauttaaltaan kylmäsiltojen välttämiseksi. [3, s. 100.]

Eräät höyrystinvalmistajat kiinnittävät tyyppikilpensä erillisellä varrella kylmälaitteisiinsa, kuten höyrystimiin, jolloin kilvet ovat helposti luettavissa, eikä eristeeseen tarvitse tehdä erillisiä ”luukkuja” kilpien lukemista varten. Tämä mahdollistaa myös kilpien lukemisen laitoksen ollessa käynnissä, sillä höyrystimen kyljessä oleva tyyppikilpi (kuva 14) ei jäädy umpeen.



Kuva 14. Erään laitoksen höyrystimen kyljessä oleva tyyppikilpi laitoksen ollessa käynnissä.

### 3 Tulokset

#### 3.1 Laitoksen toimintaselostus

Esimerkkikohteena käytetyn Kuopion Lippumäen tekojään höyrystinteho määriteltiin simuloimalla kentän tehotietoja IDA ICE-Ice Rinks and Pools -ohjelmistolla. Höyrystinteho määräytyi kustannustehokkuuden ja jään tekoon kuluvan ajan mukaan. Simuloinnissa tarkasteltiin neljää eri tehoista kylmäkoneistoa. Suurin höyrystinteho määrättiin kokeusperäisen tehomitoituksen  $200 \text{ W/m}^2$  mukaan, jolloin tekojään kokonaishöyrystintehoksi tuli 2,4 MW. Simulointituloksista selvisi, että tämä mitoitusteho on tarpeettoman suuri, sillä liuoksen mitoitusmenolämpötilan ollessa  $-15 \text{ }^\circ\text{C}$  ei kokonaishöyrystintehoa saatu kentästä. Mitoitustehoa pienennettäessä kasvaa jään tekemiseen kuluva aika. Pie-nimmällä simuloitulla mitoitusteholla  $125 \text{ W/m}^2$  jään muodostamiseen kuluva aika kasvoi lähes seitsemään vuorokauteen. Simuloidessa näiden kahden mitoitustehon välillä huomattiin, että höyrystinteholla 1,9 ja 1,7 MW saavutettiin noin 5,5 vuorokauden jäänmuodostumisaika. Kustannustehokkuuden ja jään muodostumiseen kuluvan ajan perusteella valittiin laitoksen mitoitushöyrystintehoksi 1,8 MW. [13, s. 40.]

Tekojään lämpötiloja pidetään asetusarvossaan säätämällä tekojäästä palaavan kenttäliuoksen lämpötilaa. Meno- ja paluuliuoksen lämpötilaerona pidetään 3 K:ä säätämällä liuospumppujen pyörimisnopeutta taajuusmuuttajien avulla. Paluulämpötilan erotessa asetusarvosta pumppujen pyöriessä täydellä teholla lisätään laitoksen kompressoreiden pyörimisnopeutta taajuusmuuttajasäädöllä, jolloin laitoksen kylmäteho kasvaa. Paluuliuoksen asetuslämpötilaa ohjataan ulkolämpötilan mukaan taulukon 11 mukaisesti. [14, s. 1.] Ammoniakkijärjestelmän höyrystymislämpötila asetettiin 3 K kylmäliuoksen menolämpötilaa alhaisemmaksi. Lauhtumislämpötilaksi valittiin  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . [16, s. 11.]

Taulukko 11. Palaavan liuoksen asetustemperatura ulkolämpötilasta riippuen [14, s. 1].

Ulkolämpötila °C	Kylmäliuos, paluu °C
≥ +5...+3	-12
+2...0	-8
-1...-3	-6
-4...-6	-5
≤ -7	Seis

Jääradan kylmäkoneisto sisältyy kokonaisuudessaan konttiin, jolloin kaikki ammoniakkaa sisältävät putkistot ja laitteet rajoittuvat kontin sisäpuolelle. Näin voidaan varmistua kylmälaitoksen turvallisuudesta. Koneiston liuospuolen komponentit ja putkistot rakennetaan toiseen konttiin, ja kontit yhdistetään työmaalla ja liuosputkisto kytketään kylmäkoneistoon. Laitoksen valmistaa Yleiskylmä-Findri Oy, joka hankkii laitevalmistajilta tarvittavat laitteet ja komponentit. [15, s. 1.]

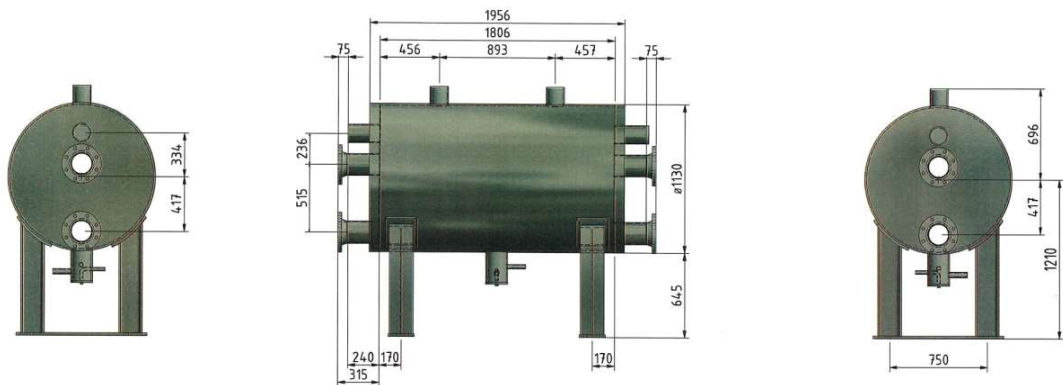
### 3.2 Höyrystin

Laitoksen suuren höyrystintehontarpeen vuoksi valittiin märkähöyrysteinen järjestelmä. Höyrystinmalliksi valikoitui suomalaisen laitevalmistajan Vahterus Oy:n yhdistetty kuori-levylämmönsiirrin. Höyrystin sisältää pisaranerotusjärjestelmän vaipan sisällä, jolloin järjestelmän imuputkeen ei tarvita erillistä pisaranerotinta. Erillistä nestesäiliötä ei myöskään tarvita. Höyrystimen vaipan alaosaan on valmistettu öljytasku, josta kylmäaineen mukana kulkeutunut öljy voidaan ohjata takaisin kompressoreille. Höyrystimen materiaalit valittiin ammoniakille sekä kalsiumkloridille soveltuviksi, jolloin lämmönsiirtolevyt valmistettiin titaanista ja vaipparunko hiiliteräksestä. (Kuvat 15–17.)


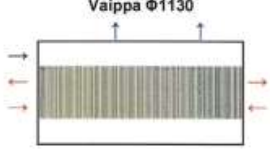




Kuva 15. Vahterus Plate & Shell Heat Exchanger Combined Findrin tehtaalla eristystyöväi-  
heessa.



Kuva 16. Vahterus Plate & Shell Heat Exchanger Combined, preliminary drawing [17].

 <b>- PLATE &amp; SHELL - ® Täysin hitsattu levylämmönsiirrin</b> <b>Märkähöyrystin/ Combined</b>		V4.7F-OM	
Pvm	29.6.2018		
Tarjousnumero	C18-55-5138G-1	<b>Tyyppi PSHE 9/7HH-568/1/1</b>	
Tekijä	MVI		
Asiakas	Oy Yleiskylmä-Findri Ltd		
Ref:	Kuopio		
Projekti			
Laitenimi/no.	Märkähöyrystin 1800 kW		
<b>Lämpötekninen mitoitus:</b>			
Teho	kW	1800	
Lämmönsiirtopinta-ala	m <sup>2</sup>	254.3	
Logaritminen lämpötilaero	°C	4.2	
K-arvo	W/m <sup>2</sup> K	1695	
Likaantumiskerroin	m <sup>2</sup> K/W	0.00012770	
Ylimiöitys / -Lämmönsiirtopinta %		>15	
		<b>Levyypuoli (Kuuma)</b>	<b>Vaippapuoli (Kylmä)</b>
Sisääntulolämpötila	°C	-12.0	25.0
Ulostulolämpötila	°C	-15.0	-18.0
Höyrystyslämpötila	°C		-18.0
Lauhtumislämpötila	°C		
Massavirta	kg/s	216.9	1.6
Painehäviö	kPa	64.7	2.1
Nestetilavuus	dm <sup>3</sup>	301.2	1140.5
			Filling without boxes in operation: 344.6 kg Ammonia (2.07 bara)
<b>Virtausaine</b>		CaCl <sub>2</sub> 27%	
Dynaaminen viskositeetti	kg/ms	0.008601	
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	1265	
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK	2766	
Lämmönjohtavuus	W/mK	0.5074	
<b>Yhteet:</b>	Koko (DN)	Luku-määrä	Nopeus m/s
Levyypuoli / Sisään	150	2	4.302
Levyypuoli / Ulos	150	2	4.302
Vaippapuoli / Sisään	125	1	10.4
Vaippapuoli / Ulos	125	2	33.88
	Actual velocity/max: 0.99 / 1.06 m/s. Design OK!		
<b>Rakenne:</b>			Yhdistetty pizaranerotin
Päätytyyppi		Hitsatut päädyt	Content: Dangerous
Massa (kuivana)	kg	3608	Category: IV
Asento		Vaaka-asento	Module: B+D
Rakennehyväksyntä		PED	Inspector: Vahterus Oy (CE)
Suunnittelupaine	bar(g)	-1/16	
Testipaine	bar(g)	30.96	
Suunnittelulämpötila	°C	-29 / 120	
Tuenta		Vaippajalat (Fe37B)	
<b>Materiaalit:</b>			
Levyymateriaali		Titanium 1mm	
Vaippamateriaali		Carbon Steel	
Virtausohjainmateriaali		No fl. director	
Pääty-yhteet		WN-RF-Flange DN 150 PN25-40 Ti F2 SB-381	
Vaippayhteet/ Sisään		Stub End	
Vaippayhteet / Ulos		Stub End	
Pintakäsittely (Vaippa)			
- Ruostumaton teräs		Lasikuulapuhallus	
- Hiiliteräsosat		White RAL 9010	
Performance is conditioned on the accuracy of customer's data and customer's ability to supply equipment and products in conformity therewith.			

Kuva 17. Höyrytimen mitoitus tiedot [17].

### 3.3 Kompressorit

Kompressoreiden mitoitus on suoritettu laitevalmistaja Bitzerin mitoitusohjelmistolla. Koska kylmäaineena käytetään ammoniakkia, valikoitui kompressorityypiksi avoin ruuvi-kompressori. Suuren kylmätehon johdosta laitokseen mitoitettiin kolme laitevalmistajan suurinta avoruuvikompressoria. Kun kentän jäädytys aloitetaan, tarvitaan kylmäkoneis-tosta laitoksen huippukylmäteho 1,8 MW. Tällöin kaikki kompressorit ovat käytössä. Kompressorit on mitoitettu siten, että yhden kompressorin teho riittää jään ylläpidonai-kaiseen tarpeeseen 0,6 MW. Tämä mahdollistaa kompressoreiden käytön vuorottelun, joka pitkittää laitoksen huoltovälejä ja kuluttaa kompressoreita tasaisesti. Kompressorit on varustettu käyttötuntilaskureilla [14, s. 3]. Kompressorit on varustettu taajuusmuutta-jilla ja niitä voidaan säätää osatehosta 25 % täyteen tehoon portaattomasti [16, s. 11].

Kompressorit käynnistyvät ratapumppujen käynnistyttyä ja toimivat vuorotteluperiaat-teella taajuusmuuttajien ohjaamina. Kompressori pyörii minimiteholla 120 sekuntia käyn-nistyksen jälkeen kulumisen estämiseksi ja rikkoutumisen välttämiseksi, jonka jälkeen tehoa nostetaan vaadittavan kylmätehon mukaisesti. Kompressoreiden käynnisty-miseksi vaaditaan seuraavat kriteerit:

- Vähintään yhden kylmäliuospumppun on oltava käynnissä.
- Höyrystimessä oleva nestemäinen kylmäaine ei saa ylittää nestepinnan ylärajaa.
- Öljynerottajassa on oltava riittävästi öljyä.
- Liuos- sekä lauhdepiirin minimipaine on vähintään 1 bar kaikkien pumppujen pyö-riessä. [14, s. 1–2.]

Imupaineen laskiessa alle asetusarvon 1,8 bar, alkaa automaatiojärjestelmä alentamaan kompressoreiden kierrosnopeuksia. Kompressoreiden tehonsäädöllä voidaan järjestel-män imupaine pitää asetetussa arvossa. Mikäli paine laskee alle 1,4 bar:n pysähtyvät kompressorit ja järjestelmään lähtee hälytys liian alhaisesta paineesta. Mikäli koneiston korkeapaine nousee yli sallitun 15 bar:n, säätää automatiikka samalla tavalla kompres-

soreiden tehoa kierrosnopeutta pudottaen, kunnes korkeapaine saavuttaa asetustarvonsa. Paineen noustessa yli 18 bar:n pysähtyvät kompressorit ja järjestelmä lähettää korkeapainehälytyksen. Näiden toimintojen lisäksi jokaisessa kompressorissa on myös kaksiportainen korkeapainepressostaatti joka pysäyttää kompressorin, mikäli paine järjestelmässä nousee yli 20 bar:n. [14, s. 2–3.]

Bitzerin kompressorimitoitushjelmiston käyttöä on ohjeistettu seuraavaksi esimerkki-kohteen mitoitustietoja hyväksi käyttäen. Mitoitus aloitetaan valitsemalla haluttu kompressorityyppi (kuva 18). Esimerkkikohteen kylmätehokokoluokan ammoniakikylmäjärjestelmässä ainoa vaihtoehto on avoin ruvikompressor (Open Drive Screws). Tarkastellessa ohjelmiston muita kompressorityyppejä, huomataan, ettei niillä voi valita ammoniakkia järjestelmän kylmäaineeksi.



Kuva 18. Mitoitusohjelmiston aloitusnäky [21].

Kompressorityypin valinnan jälkeen alkaa kompressorin mitoitus kuvan 19 mukaisesti. Mitoitus aloitetaan syöttämällä ohjelmistoon haluttu kylmäaine (1), prosessin kylmäteho (2) sekä höyrystymis- ja lauhtumislämpötilat (3). Näiden lisäksi tulee ohjelmistoon myös syöttää haluttu alijäähtyminen lauhtumislämpötilassa (4) sekä kylmäaineen tulistuminen ennen kompressorin (5). Lisäjäähtyksen (Additional cooling) alavalikosta voidaan valita kompressorikoneiston mitoitukseen mukaan öljynjäähdytysjärjestelmä (6), ja sen luoma

kylmäainehöyryn jäähtyminen kompressorin painepuolella (7). Lopuksi valitaan kompressorin pyörimisnopeus (8).

Open Screw Compressors OS

Series: all

Refrigerant: R717 (NH3) (1)

Reference temperature: Dew point temp.

Compressor selection

Cooling capacity: 1800 kW (2)

Compressor model

Incl. former types

Operating point

Evaporating SST: -18 °C (3)

Condensing SDT: 25 °C

Operating conditions

with Economiser

Liq. subc. (in condenser): 0 K (4)

Suct. gas superheat: 0 K (5)

Useful superheat: 100 %

Additional cooling: External oil cooling (6)

Max. discharge gas temp.: 69 °C (7)

Drive

Compressor speed: 3500 /min (8)

Show Overview

25,0 °C

25,0 °C

n/a

n/a

-18,0 °C

-18,0 °C

-18,0 °C

Result Limits Technical Data Dimensions Information Documentation Trainings

Kuva 19. Kompressorin mitoituksen lähtötiedot [21].

Lähtötietojen syöttämisen jälkeen mitoitusta suoritettaessa antaa ohjelmisto sopivimman kompressorityypin tiedot. Esimerkkikohteen järjestelmän tiedoilla ehdottaa ohjelmisto Bitzerin suurinta kompressorimallia (kuva 20).


Compressor	OSKA95103-K
Capacity steps	100%
Cooling capacity	602 kW
Cooling capacity *	602 kW
Evaporator capacity	602 kW
Shaft power	152,8 kW
Condenser Capacity	682 kW
COP/EER	3,94
COP/EER *	3,94
Mass flow LP	1911 kg/h
Mass flow HP	1911 kg/h
Operating mode	Standard
Liquid temp.	25,0 °C
Oil volume flow	6,04 m <sup>3</sup> /h
Oil cooler outlet	43,9 °C
Oil cooler load	72,7 kW
Recommended driving motor	180,0 kW
Discharge gas temp. w/o cooling	123,5 °C

Kuva 20. Ohjelmiston ehdottaman kompressorityypin mitoitus tulokset [21].

Tuloksista huomataan, että kyseisellä kompressorilla saadaan tuotettua kolmasosa laitoksen kokonaiskylmätehosta. Tämä tarkoittaa, että esimerkkitilanteen huipputeho vaatii kolme tällaista kompressoria rinnan kytkettynä. Ohjelmiston ylävalikosta voidaan mitoitus ottaa mukaan useampi kompressorityyppiä, mutta tyyppiä voidaan myös muuttaa manuaalisesti ajettaessa mitoitus uudelleen. Muuttamalla kompressoreiden lukumäärää sekä mallia, voidaan tarkastella eri koneistokokonaisuuksien eroja keskenään. Kuvassa 21 on vertailun vuoksi mitoitettu sama järjestelmä neljällä pienempitehoisella kompressorilla.

Overview [Detail](#)

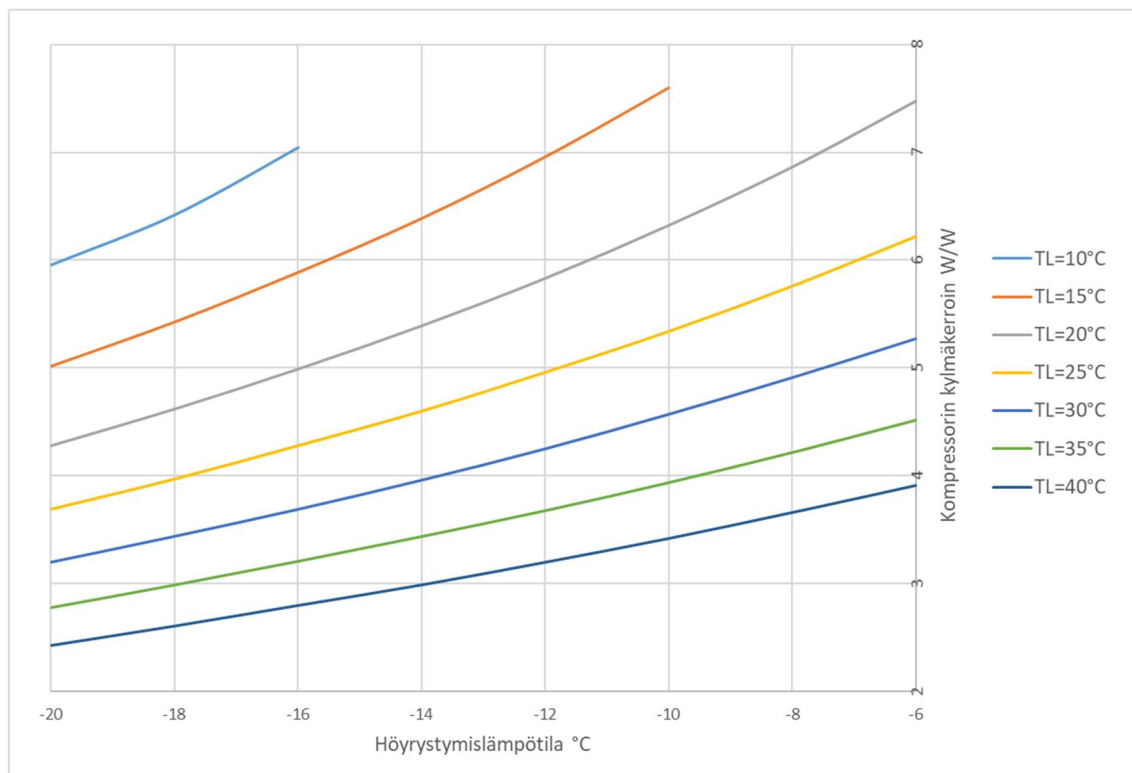
**A**

Evaporating SST	-18,00	°C			
Condensing SDT	25,0	°C			
	Qe	Pe	EER	Ratio	
	kW	kW	W/W	%	
Total	1798	462	3,89	-	
OSKA9593-K	449	115,5	3,89	25,0	
OSKA9593-K	449	115,5	3,89	25,0	
OSKA9593-K	449	115,5	3,89	25,0	
OSKA9593-K	449	115,5	3,89	25,0	

Kuva 21. Laitoksen mitoitus neljällä kompressorilla [21].

Tuloksista huomataan, että kylmäteho jää hieman mitoitus-tehoa pienemmäksi, sekä kylmäkerroin (EER) laskee. Laitoksen kompressorikokoja ja kappalemääriä muutettaessa huomataan, että teho jää joko liian pieneksi tai ylimitoitus on suhteellisesti liian suuri. Oletetusti myös hankintakustannukset kasvavat kompressoreiden määrän lisääntyessä. Kompressorikoneiston valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat kompressorin ottoteho ja sen vaikutus laitoksen kylmäkertoimeen, kompressoreiden kylmätehon riittävyys sekä hankintakustannukset. Ohjelmiston ehdottama laitekokoisuus osoittautui järkevimmäksi vaihtoehdoksi.

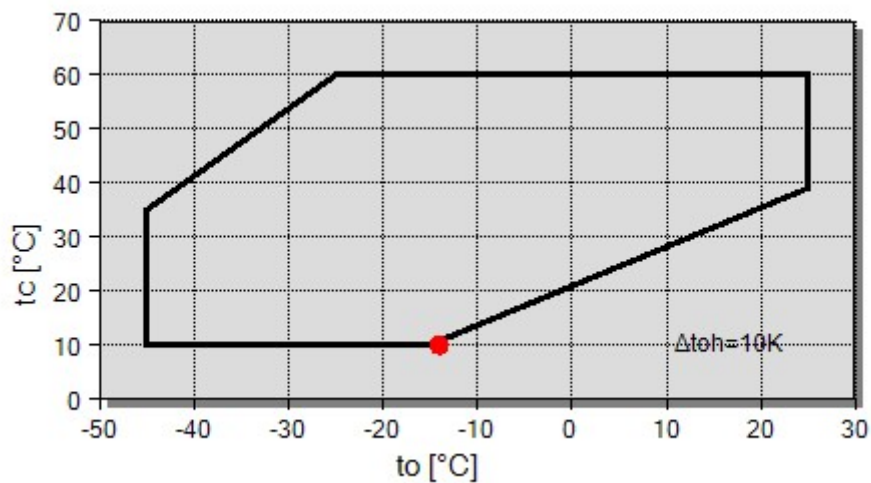
Kylmäkertoimeen vaikuttavat myös järjestelmän toimintalämpötilat. Järjestelmän kylmäkertoimia on vertailtu kuvassa 22 eri lauhtumis- ja höyrystyslämpötilojen funktiona. Höyrystyslämpötilan raja-arvoiksi on asetettu esimerkikohteen pienin tarkasteltu höyrystyslämpötila  $-20\text{ °C}$ , sekä suurin lämpötila  $-6\text{ °C}$ , jolla lämmönkeruuliuos voi vielä jäädyttää kenttää. Höyrystyslämpötilassa on otettu huomioon kylmäaineen höyrystyslämpötilan ja kenttään menevän lämmönkeruulioksen välinen  $3\text{ K}$ :n lämpötilaero. Kylmäkertoimet on kerätty Bitzerin mitoitusohjelmistosta asettamalla lauhtumislämpötila viiden asteen välein väliltä  $10\text{--}60\text{ °C}$ .



Kuva 22. Kylmäkertoimien vertailu eri lauhtumislämpötiloilla.

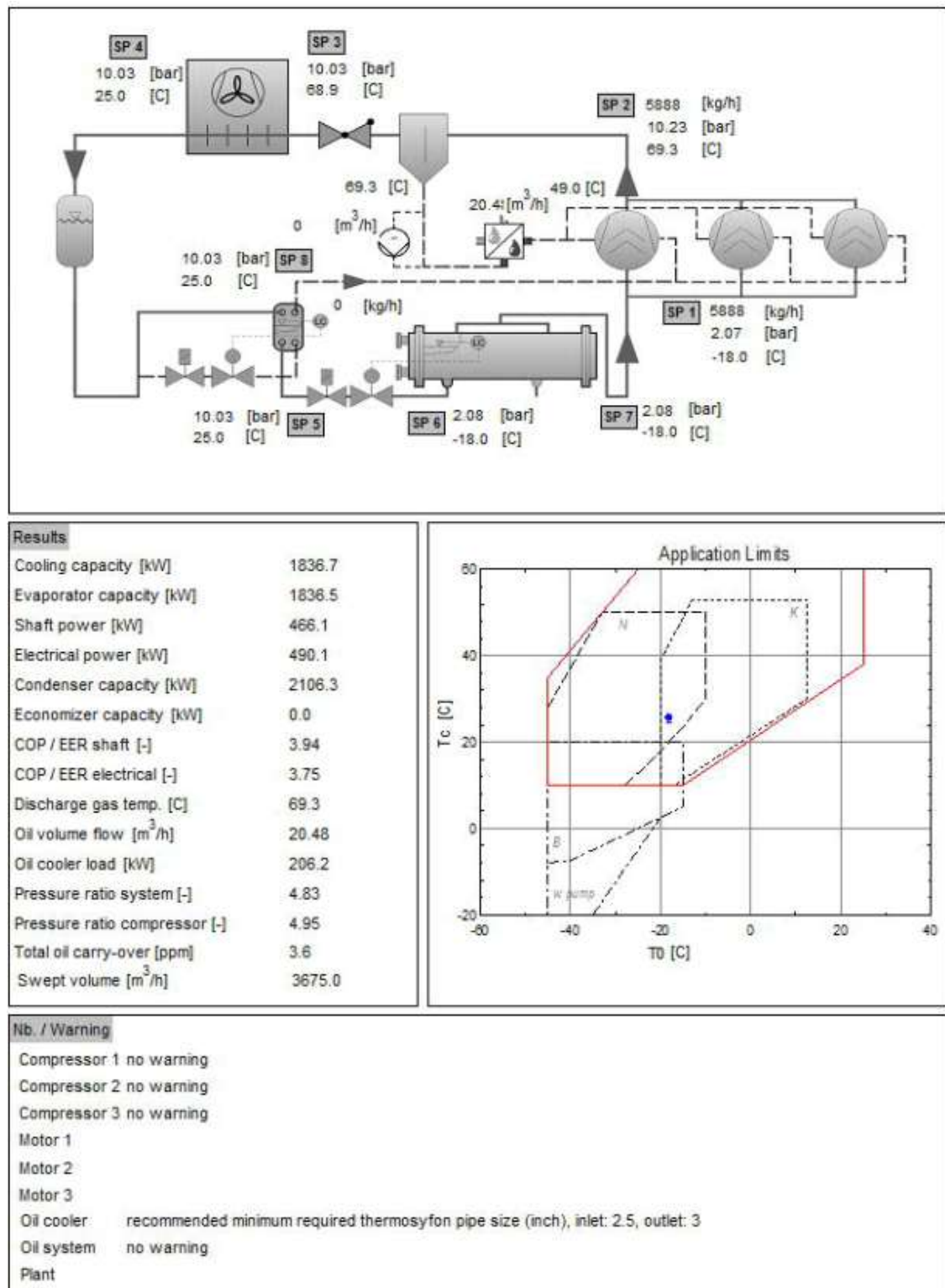
Kuvaajasta voidaan todeta kylmäkertoimen suuruuteen vaikuttavan höyrystymis- ja lauhtumislämpötilan välinen ero. Toimintalämpötilojen eron kasvaessa suurenee kompressorin ottoteho, joka näkyy kylmäkertoimen pienenemisenä. Laitoksen toimintaa kuitenkin rajoittavat toimintapisteiden raja-arvot, jotka on esitetty kuvassa 23.





Kuva 23. Toimintapisteiden raja-arvot [21].

Kuvassa 24 on esitetty esimerkkikohteen todellinen kompressorimitoitus kylmälaiteura-koitsijan sekä Bitzerin toimesta.



Kuva 24. Esimerkkikohteen kompressoreiden todellinen mitoitus [14].

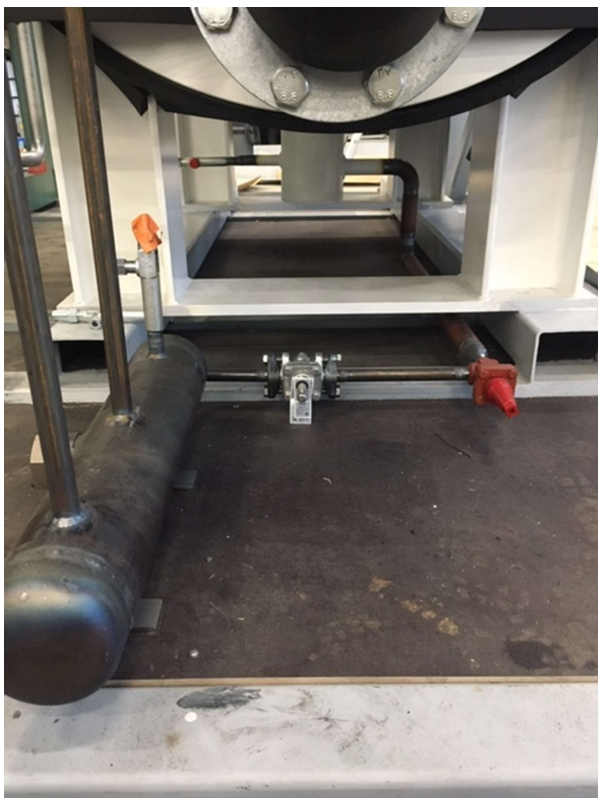


Kuva 25. Kompressoripaketti Findrin tehtaalla. Kuvassa näkyy kolme ruuvikompressoria paketin päällä, alla vasemmalla yhdistetty öljynerotin/-säiliö ja alla keskellä öljynjäähdytin. Kompressoripaketin oikealla puolella höyrystin.

### 3.4 Öljyjärjestelmä

Öljynerotin ja öljysäiliö on yhdistetty yhdeksi kokonaisuudeksi, joka on kytketty kompressoreiden jälkeen paineputkeen. Erottuva öljy painuu tiheyseron ansiosta säiliön pohjalle kylmäainehöyryn jatkaessa matkaa kohti lauhdutinta. Öljyn jäähdytys on toteutettu lauhdutinpiirin nesteellä. Kompressoreissa kuumentunut öljy ohjataan öljynjäähdyttimen kautta takaisin öljysäiliöön, josta se ruiskutetaan uudelleen kompressoreille. Ammoniakkin käyttö järjestelmän kylmäaineena vaatii tehokkaan öljynerotuksen sekä suuren öljymäärän. Öljyn jäähdytyksestä on selvää hyötyä, sillä jäähdytetty kompressorin puristustilaan ruiskutettava öljy alentaa korkeapaineisen kylmäainehöyryn lämpötilaa, minkä ansiosta laitoksen hyötysuhde kasvaa. Öljyn jäähdyttävä teho korkeapaineisessa kylmäainehöyryssä voidaan vähentää lauhduttimen tehosta, minkä vuoksi lauhduttimen tehollinen koko myös pienenee. [9]

Öljyn liukenemattomuus ammoniakkiin aiheuttaa myös sen, että järjestelmän höyrystin on varustettava öljynpalautusjärjestelmällä. Höyrystimessä on vaippaosan alapäässä öljytasku (kuva 26), josta vaipan alaosaan kertyvä öljy ohjataan takaisin kompressoreiden öljynkiertoon. Öljy johdetaan höyrystimen öljytaskusta putkea pitkin öljynkerääjälle, joka täyttyessään asetusarvoonsa palauttaa öljyn kompressoreiden öljynkiertoon kompressoreiden imu- ja painepuolen paine-eron avulla. [9]



Kuva 26. Höyrystimen öljytasku ja öljynkerääjä.

### 3.5 Putkisto

Laitoksen ammoniakkiputkisto valmistetaan P235GH-teräsputkesta. Putken seinämävahvuudet on valittu PSK käsikirjan nro.7 mukaisesti PN25/PN40. [15, s. 1.]

Kylmäkoneiston putkistot on mitoitettu kylmälaiteurakoitsija Yleiskylmä-Findri Oy:n toimesta. Putkiston teoreettista mitoitusta on tarkasteltu ensin CoolPack-ohjelmiston log p,h -tilapiirroksen avulla, minkä jälkeen on verrattu saatuja virtausnopeuksia sekä painehäviöitä Danfoss Oy:n Coolselector 2 -komponentti- ja putkimitoitushjelmiston arvoihin. Näissä laskelmissa ei ole otettu kantaa todellisen putkiston muotojen ja korkeuserojen vaikutuksista lopputuloksiin, sillä laitoksen putkistosuunnitelmat eivät olleet saatavilla.

Taulukossa 12 on esitetty neste-, imu- sekä paineputken mitoitus CoolPack-ohjelmiston arvoilla. Laitoksen putkikoot on saatu esimerkkikohteen suunnitteluasiakirjoista. Laitoksen toiminta on piirretty log p,h -tilapiirroksen, josta on saatu laskennassa tarvittavat aineominaisuudet eri toimintapisteissä. Kitkavastuskerroin on määritetty Prandtl-Colebrookin yhtälön 9 avulla.

Taulukko 12. Putkimitoitus log p,h -tilapiirroksen avulla.

Putkimitoitus (Log p,h)	Nesteputki	Imuputki	Paineputki
DN	100	250	150
Ominaistilavuus (m <sup>3</sup> /kg)	0,0017	0,57	0,17
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	581,40	1,76	5,90
q <sub>m</sub> (kg/h)	5888	5888	5888
q <sub>m</sub> (kg/s)	1,64	1,64	1,64
d <sub>s</sub> (m)	0,1071	0,2604	0,1593
v (m/s)	0,31	17,43	13,90
Dynaaminen viskositeetti (Pas)	0,00013	0,00001	0,00001
Kinemaattinen viskositeetti (m <sup>2</sup> /s)	2,22E-07	0,000006	0,000002
Reynoldsin luku (Re)	144472	806938	1307253
Putken karheus k (mm)	0,05	0,05	0,05
Kitkavastuskerroin λ	0,019	0,015	0,016
Ekvivalenttipituus (m)	10	10	10
Δp (Pa)	47	154	559
Δp (bar)	0,0005	0,0015	0,0056

Taulukossa 13 on samat putkisto-osuudet mitoitettu Danfoss Oy:n Coolselector 2 -mitoitushjelmistolla. Ohjelmistoon on syötetty järjestelmän lähtöarvot, joilla saatiin seuraavat tulokset putkisto-osuuksien mitoituksessa. Mitoitusohjelmisto käyttää samoja teräsputken seinämävahvuuksia.

Taulukko 13. Coolselector2-mitoitusohjelmiston mukainen putkistomitoitus.

Putkimitoitus, Coolselector 2	Nesteputki	Imuputki	Paineputki
DN	100	250	150
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	602,6	1,746	6,417
q <sub>m</sub> (kg/h)	5888	5888	5888
d <sub>s</sub> (m)	0,1071	0,2604	0,1593
v (m/s)	0,3	17,59	12,79
Δp (bar)	0,0005	0,0015	0,005

Itse suoritettujen laskennan ja mitoitusohjelmiston laskennan välillä voidaan todeta olevan pieniä eroavaisuuksia tuloksissa. Seuraavassa taulukossa 14 on laskettu samat putkistomitoitukset, mutta tiheystietoina on log p,h -tilapiirroksista saatujen tiheyksien sijasta käytetty mitoitusohjelmistosta saatuja tiheyksiä eri toimintapisteissä.

Taulukko 14. Omien putkistomitoitusten tarkastus Coolselector2 -ohjelmiston tiheyksillä eri toimintapisteissä.

Putkimitoituksen tarkastus	Nesteputki	Imuputki	Paineputki
DN	100	250	150
Ominaistilavuus (m <sup>3</sup> /kg)	0,0017	0,57	0,16
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	602,6	1,746	6,417
q <sub>m</sub> (kg/h)	5888	5888	5888
q <sub>m</sub> (kg/s)	1,64	1,64	1,64
d <sub>s</sub> (m)	0,1071	0,2604	0,1593
v (m/s)	0,30	17,59	12,79
Dynaaminen viskositeetti (Pas)	0,00013	0,00001	0,00001
Kinemaattinen viskositeetti (m <sup>2</sup> /s)	2,15E-07	5,73E-06	1,56E-06
Reynoldsin luku (Re)	150379	799714	1307253
Putken karheus k (mm)	0,05	0,05	0,05
Kitkavastuskerroin λ	0,019	0,015	0,016
Ekvivalenttipituus (m)	10	10	10
Δp (Pa)	49	153	515
Δp (bar)	0,0005	0,0015	0,005


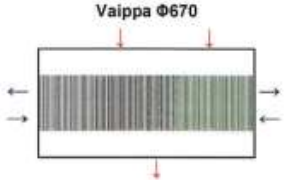
Laskennasta huomataan, että tulokset ovat samat kuin mitoitusohjelmistolla laskettaessa. Näin voidaan todeta omien laskelmien laskentaperiaatteiden olevan samat kuin

mitoitushjelmistossa. Eron tulosten laskennoissa voidaan olettaa johtuvan luentatarkkuudesta selvitetäessä toimintapisteiden arvoja log p,h -piirroksista. Tiheyserot vaikuttavat virtausnopeuteen sekä Reynoldsin lukuun. Kitkavastuskertoimen suuruus on riippuvainen Reynoldsin luvun suuruudesta, jolloin tiheyden muutokset vaikuttavat myös painehäviöihin. Mitoitushjelmiston raportti kyseisten putkisto-osien mitoituksesta on esitetty liitteessä 1.

Tämän mitoitustarkastelun tarkoituksena on todistaa laskentaperiaatteiden oikeellisuus käyttämällä hyväksi esimerkikohteessa käytettyjä putkikokoja. Putkikoot on valittu kylmälaiteurakoitsija Findri-Yleiskylmä Oy:n toimesta ja mitoitettu todellisilla suunnitteluarvoilla. Tämän työn esimerkkitarkasteluista ei voi johtaa johtopäätöksiä todellisen kylmäkoneiston valituista putkikoista.

### 3.6 Lauhdutin

Järjestelmän lauhdutinteho on 2,1 MW. Öljyn jäähtymisestä johtuva kuumakaasun lämpötilan lasku alentaa lauhdutintehontarvetta. Lauhduttimeksi valittiin rakenteeltaan ja toiminnaltaan höyrystintä vastaava Vahterus Oy:n valmistama kuori-levylämmönsiirrin. Lauhduttimeksi valikoitunut lämmönsiirrin on kuitenkin huomattavasti pienempi kooltaan verrattuna höyrystimeen. Lauhdutinjärjestelmän liuokseksi on valittu 40-prosenttinen etyleeniglykoli. Liuoksen suuri massavirta sekä suuri lämpötilaero kylmäaineen ja lauhdutinliuoksen välillä mahdollistavat pienemmän lämmönsiirtopinta-alan käytön kuin höyrystimessä. Jos lämpöä ei oteta talteen, kannattaa lauhtumispaine pitää niin alhaalla kuin sallitaan [22]. Lämmönsiirtolevyjen materiaalina on käytetty ruostumatonta terästä ja vaippa on valmistettu hiiliteräksestä. Kuvassa 27 on esitetty lauhduttimen mitoitus.

 <b>- PLATE &amp; SHELL - ® Täysin hitsattu levylämmönsiirrin</b> <span style="float: right;">V4.71-OM</span>				
<b>Lauhdutin</b>				
Pvm	4.5.2018	<b>Tyyppi PSHE 5HH-454/1/1</b>		
Tarjousnumero	C18-55-5138A-2			
Tekijä	MVI			
Asiakas	Oy Yleiskylmä-Findri Ltd			
Ref:	Kuopio			
Projekti				
Laitenimi/no.	Lauhdutin 2100 kW			
<b>Lämpötekninen mitoitus:</b>				
Teho	kW	2100		
Lämmönsiirtopinta-ala	m <sup>2</sup>	118.4		
Logaritminen lämpötilaero	°C	7.5		
K-arvo	W/m <sup>2</sup> K	2351		
Likaantumiskerroin	m <sup>2</sup> K/W	0.00002656		
Ylimitoitus / -Lämmönsiirtopinta %		10/10		
		<b>Levyvuoli (Kylmä)</b>		<b>Vaippavuoli (Kuuma)</b>
Sisääntulolämpötila	°C	18.0		80.0
Ulostulolämpötila	°C	24.0		28.0
Höyrystyslämpötila	°C			28.0
Lauhtumislämpötila	°C		28.0	
Massavirta	kg/s	99.6	1.6	
Painehäviö	kPa	57.9	0.7	
Nestetilavuus	dm <sup>3</sup>	128.8	209.4	
<b>Virtausaine</b>		Ethyleneglycol 40%	Ammonia (10.97 bara)	
Dynaaminen viskositeetti	kg/ms	0.002884		
Tiheys	kg/m <sup>3</sup>	1047		
Ominaislämpökapasiteetti	J/kgK	3515		
Lämmönjohtavuus	W/mK	0.4543		
<b>Yhteet:</b>	<b>Koko (DN)</b>	<b>Lukumäärä</b>	<b>Nopeus m/s</b>	
Levyvuoli / Sisään	100	2	5.278	
Levyvuoli / Ulos	100	2	5.278	
Vaippavuoli / Sisään	150	2	5.933	
Vaippavuoli / Ulos	100	1	0.3003	
<b>Rakenne:</b>				
Päätytyyppi		Hitsatut päädyt	Content: Dangerous	
Massa (kuivana)	kg	1470	Category: IV	
Asento		Vaaka-asento	Module: B+D	
Rakennehyväksyntä		PED	Inspector: Vahterus Oy (CE)	
Suunnittelupaine	bar(g)	-1/25		
Testipaine	bar(g)	48.6		
Suunnittelulämpötila	°C	0 / 150		
Tuenta		Vaippajalat (Fe37B)		
<b>Materiaalit:</b>				
Levy materiaali	AISI 316L 0.7mm			
Vaippamateriaali	Carbon Steel			
Virtausohjainmateriaali	EPDM (short)			
Pääty-yhteet	Stub End			
Vaippayhteet/ Sisään	Stub End			
Vaippayhteet / Ulos	Stub End			
Pintakäsittely (Vaippa)				
- Ruostumaton teräs	Lasikuulapuhallus			
- Hiiliteräsosat	White RAL 9010			
<i>Performance is conditioned on the accuracy of customer's data and customer's ability to supply equipment and products in conformity therewith.</i>				

Kuva 27. Lauhduttimen mitoitustiedot [17].



## 4 Pohdinnat

### 4.1 Kylmäkoneistojen suunnittelu

Insinööriyötä tehdessä selvisi nopeasti, että tekojaiden energiajärjestelmien kehittyessä simulointimallien ja tarkemman olosuhdetarkastelun avulla ei järjestelmän kylmäkoneistojen suunnittelu ole juurikaan muuttunut verrattuna aiemmin kokemusperäisillä mitoitus-tiedoilla suunniteltuihin järjestelmiin. Muuttuvana tekijänä ovat vain niillä pumpattavat energiamäärät. Simulointituloksista saatu pienempi huippukylmätehontarve mahdollistaa kuitenkin pienempien koneistojen käytön aikaisempiin laitoksiin verrattuna.

Lippumäen tekojään simuloinneissa saavutettiin energiansäästöä mitoitus-tehon lasken-nassa 700 kW alentamalla kokemusperäistä mitoitus-tehoa 200 W/m<sup>2</sup> tehoon 143 W/m<sup>2</sup>. Tällä mitoitus-tehon alentumalla saavutettiin järjestelmän hankintakustannuksissa noin 400 000 euron säästö [16].

### 4.2 Kylmäaine

Alati tiukentuvat energiamääräykset ja pyrkimyksemme vähäisempään ympäristön kuor-mitukseen asettavat paineita kylmäteknikan alalle yleisesti. Tiukentuva lainsäädäntö poissulkee monien kylmäaineiden käytön tulevaisuudessa. Poistuvia kylmäaineita kor-vaamaan on kehitteillä lukemattomia eri vaihtoehtoja, mutta niiden käyttöönotto voi kes-tää vielä kauan. Vaikka teollisen kylmän laitokset ovatkin melko turvassa kylmäainelain-säädännön tiukentumiselta luonnollisten ja ympäristöturvallisten kylmäaineiden ansi-osta, ei se tarkoita, etteikö uusista kehitteillä olevista kylmäaineista voisi olla hyötyä tu-levaisuudessa. Ammoniaki kylmäaineena tekojäähokoluokan laitoksissa on hyvin toi-miva, mutta sen terveydelle haitallisuus sekä vaarallisuus vaativat suunnittelulta huomattavasti enemmän kuin muut kylmäaineet. Tällä hetkellä ammoniakkiin korvaajaksi toimivin kylmäaine lienee hiilidioksidi R744. Turvallisuusnäkökulmasta hiilidioksidin käyttö am-moniakiin verrattuna on hyvin perusteltua. Oikein suunnitelluissa koneistoissa aineomi-naisuuksien kuten suuren tilavuustuoton ja suuren höyrystymislämmön ansiosta hiilidi-oksidi soveltuu hyvin teollisen kylmän käyttöön. Hiilidioksidia on käytetty kylmäaineena

lähes yhtä kauan kuin ammoniakkia, kuitenkin sen käyttö korvaantui halogeenihiilivedyillä 30-luvulla [2, s. 128]. Nykypäivänä hiilidioksidin käyttöä on kehitetty uudelleen ilmastonsuojelun takia, ja se onkin saanut vankan jalansijan esimerkiksi kaupan kylmän kylmäaineena. Aineominaisuuksiltaan se on kuitenkin huomattavasti hankalampi kuin ammoniakki ja vaatii suunnittelulta erityistä huolellisuutta. Hiilidioksidin käyttö tekojääkohteissa olisi varteenotettava lisätutkimuksen kohde.

#### 4.3 Lauhdelämmön hyödyntäminen

Jatkotutkimuksen arvoinen asia tekojään energiajärjestelmän suunnittelussa on myös lauhdelämmön hyödyntäminen. Perinteisesti kentästä kerätty lämpö on pumpattu teknisen tilan katolla sijaitseville ilmajähdytteisille nestejäähdyttimille, josta lämpö vapautetaan taivaalle. Mahdollisimman hyvää energiatehokkuutta tavoitellessa tämä lämpö pitäisi saada valjastettua hyötykäyttöön, ja näin onkin alettu tekemään kohteissa, joissa tekojään vieressä sijaitsee esimerkiksi lämmitetty tekonurmikenttä. Tekojään jäähdyttämisellä kerätty lämpöenergia on ohjattu välillisen laitoksen avulla tekonurmen lämmitysenergiaksi. Tätä lämpöenergiaa olisi mahdollista käyttää myös esimerkiksi lähellä sijaitsevien rakennusten lämmityksessä. Urheilupuistoissa talteen kerättävällä lämpöenergialla voitaisiin lämmittää esimerkiksi palloiluhalleja, tekonurmikenttiä tai huoltorakennuksia. Suurien koulujen yhteydessä sijaitsee usein myös urheilukenttä, johon sisällytettäessä tekojääjärjestelmä voitaisiin talteen kerätty lämpöenergia hyödyntää koulun lämmityksessä. Lämmön hyötykäytön lisätutkimuksesta olisi hyötyä tulevaisuudessa insinööritöissä FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:n toimeksiannosta.

#### 4.4 Itsearviointi

Aiheena teollinen kylmä on erittäin haastava, ja työtä tehdessäni olen saanut hyvän yleiskuvan tekojääprojektien kokonaisuudesta. Tämän työn tavoitteena on osana muita tekojään energiajärjestelmää käsittelevien insinööritöiden kanssa tuoda liikuntapalveluiden tuottajille näkemys energiankulutuksen säästämahdollisuuksista tekojääkohteissa tapauskohtaisten simulointien avulla. Vaikka lämmönpumppausjärjestelmän mitoitus ei suoranaisesti olekaan yhteydessä simuloinnista saataviin etuihin, voidaan tämän työn mitoitusohjeen pohjalta saada suuntaa antavaa kustannustietoa asiakkaalle.

Tämän työn sisältö muodostui ainoastaan pääkomponenttien mitoituksesta. Todellista kylmäkoneiston mitoitusta ja suunnittelua varten tässä työssä selvitetty aiheet ovat vain osa koko todellisen järjestelmän komponenttien mitoitusta ja suunnittelua. Työtä tehdessä ja lämmönpumppausjärjestelmiä vertailllessani selvisi nopeasti, että pääkomponenttien lisäksi olisi todella tarpeellista käsitellä myös pienemmät osat, kuten venttiilit ja säädön sekä ohjauksen mitoitus ja suunnittelu. Tähän ei kuitenkaan tämän työn raameissa ollut mahdollisuutta. Jatkotutkimuksen kohteena olisi siis myös kylmälaitoksen muiden komponenttien ja säätöjärjestelmän mitoitusohje.

Teollista kylmää käsittelevää kirjallisuutta ei suomeksi kirjoitettuna juurikaan ole, ja tekijäitä valmistavat tahot tuntuvat yleensä haluavan pitää tietonsa itsellään markkina-arvonsa säilyttämiseksi. Poikkeuksia kuitenkin on. Tämän työn tekemiseen vaadittiin monen eri kylmäalaa koskevan kirjallisen lähteen tietojen yhdistelyä. Tiedon yhdistely ja etsiminen oli paikoittain erittäin haastavaa. Suurena apuna työn tekemisessä olivat Danfoss Oy:n Esko Kaappola sekä Findri Yleiskylmä Oy:n Jarno Harju, jotka ammattitaidollaan ja halullaan auttaa tiedon kulkeutumista mahdollistivat tämän työn syntymisen. Tulvaisuuden näkemyksemme FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy:ssä on, että tiedon jakaminen on tärkeässä asemassa pyrkimyksissämme kestävään kehitykseen ja ympäristömme sekä ilmastomme suojelemiseen.

## Lähteet

- 1 Hakala, Pertti., Kaappola, Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3. painos. Tampere: Opetushallitus.
- 2 Aittomäki, Antero. 2008. Kylmäteknikka. 3. painos. Jyväskylä: Suomen Kylmäyhdistys ry.
- 3 Aittomäki, Antero. 2001. Välilliset kylmälaitokset. 1. painos. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- 4 Talotekniikka RYL 2002 osa 1. 2002. Rakennustietosäätiö RTS & LVI-Keskusliitto ry. 1.painos. Rakennustieto Oy. Helsinki.
- 5 Kaappola, Esko. 2018. Opetusmateriaali. LVI-suunnittelu, kylmäteknikka. Helsinki.
- 6 Valkeapää, Aki. 2016. Opetusmateriaali. LVI-tekniikan mitoitusperusteet, lämmönsiirto ja virtaustekniikka. Metropolia. Espoo.
- 7 Kaappola, Esko. 2019. Sähköpostikeskustelu. Danfoss Finland Oy. 28.01.2019.
- 8 Engineering ToolBox. 2008. Verkkoaineisto. Ammonia – Thermophysical Properties. <[https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d\\_1413.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-d_1413.html)>. Luettu 28.01.2018.
- 9 Harju, Jarno. 2019. Toimitusjohtaja. Findri Yleiskylmä Oy. 11.01.2019. Tampere. Keskustelut.
- 10 Tekojääkentät ja luistelukentät. 2019. Verkkoaineisto. Helsingin kaupunki. <<https://www.hel.fi/helsinki/fi/kulttuuri-ja-vapaa-aika/liikunta/ulkoliikuntapaikat/tekojääkentat-ja-luistelukentat/>>. Luettu 31.01.2019.
- 11 Luistelukentät. 2019. Verkkoaineisto. Espoon kaupunki. <[https://www.espoo.fi/fi-FI/Kulttuuri\\_ ja\\_liikunta/Liikunta/Liikunta\\_ ja\\_ulkoilupajat/Luistelukentat/Luistelukentat\(2844\)](https://www.espoo.fi/fi-FI/Kulttuuri_ ja_liikunta/Liikunta/Liikunta_ ja_ulkoilupajat/Luistelukentat/Luistelukentat(2844))>. Luettu 31.01.2019.
- 12 Ulkojää. 2019. Verkkoaineisto. Vantaan kaupunki. <<https://www.vantaa.fi/vapaa-aika/liikunta/ulkoliikuntapaikat/ulkojää>>. Luettu 31.01.2019.
- 13 Väänänen, Otto. 2019. Ulkotekojään energijärjestelmä: Lämmönkeruujärjestelmän mitoitusohje. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.

- 14 Harju, Jarno. 2018. Toimintaselostus Lippumäen tekojäärata. Tampere. Yleiskylmä-Findri Oy.
- 15 Harju, Jarno. 2018. Kuvaus painelaitekokonaisuudesta / Laitoskuvaus. Tampere. Yleiskylmä-Findri Oy.
- 16 Autiopelto, Mika. 2018. Lippumäen tekojäärata, Energijärjestelmän elinkaarikustannusselvitys. Helsinki. FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy.
- 17 Harju, Jarno. 2018. Lippumäen tekojääradan suunnitteluasiakirjat. Tampere. Yleiskylmä-Findri Oy.
- 18 FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy. 2018. Helsinki. Lippumäen tekojääradan suunnitteluasiakirjat.
- 19 5 Reasons to use plate-and-frame heat exchangers instead of shell- and –tube. 2018. Verkkoaineisto. Alfa-Laval Nordic Oy. <<https://www.alfalaval.fi/microsites/tiivisteelliset-levylammonvaihtimet/tyokalut/levylammonvaihtimet-vs-putkilammonvaihtimet/>>. Luettu 04.03.2019.
- 20 Vahterus Plate & Shell Heat Exchangers. Verkkoaineisto. Vahterus Oy. <<https://www.edelflex.com/archivos/descargas/266/Plate-and-Shell-Heat-Exchangers.pdf>>. Luettu 04.03.2019.
- 21 Bitzer Software v6.9.1 rev2074. Verkkoaineisto. Bitzer Kühlmaschinebau GmbH. <<https://www.bitzer.de/websoftware/Default.aspx?lng=en&lang=en&country=fi>>. Luettu 13.03.2019.
- 22 Kaappola, Esko. 2019. Sähköpostikeskustelu. Danfoss Finland Oy. 22.04.2019.
- 23 Energijärjestelmät. Verkkoaineisto. FCG Oy. <<http://www.fcg.fi/fin/palvelut/energijarjestelmat/>>. Luettu 26.04.2019.



## Coolselector 2 Putkimitoitusraportti

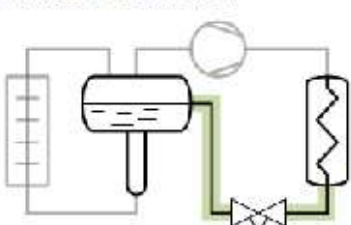


## Coolselector2

Projektitiedot	
Projektin nimi:	Esimerkkikohte: Lippumäen tekojää
Kommentit:	
Laatinut:	Sakari Milkola
Coolselector2 versio:	3.2.0. Tietokanta: 42.42.2.18.4.23
Tulostettu:	Monday, March 4, 2019
Käytetyt asetukset:	Kaikki sovellukset

## Putkisto: Nesteputki

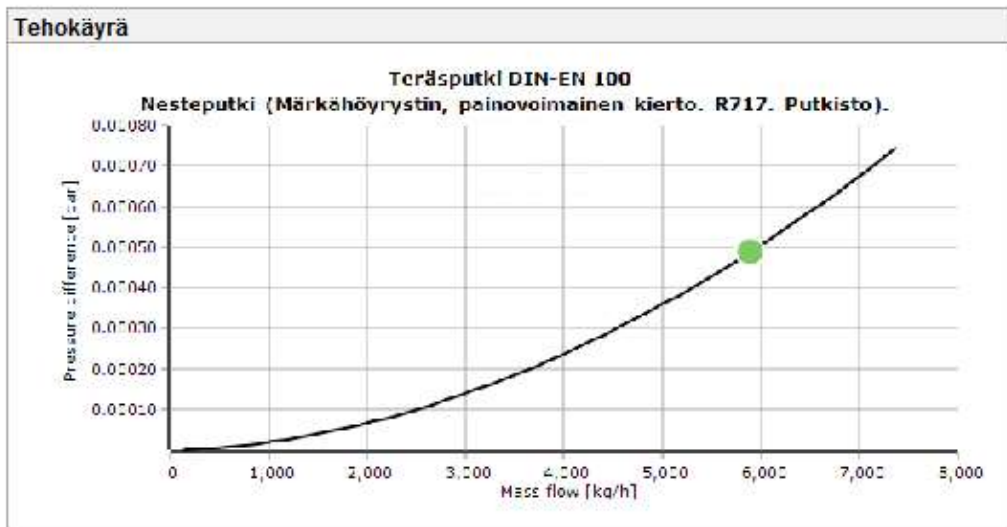
Käyttöolosuhteet			
Kylmäaine:	R717	Putkien massavirta:	5888 kg/h
Jäähdytysteho:	1836 kW	Lämmitysteho:	2103 kW
Höyrystyslämpötila:	-18.0 °C	Lauhtumislämpötila:	25.0 °C
Höyrystyspaine:	2.081 bar	Lauhtumispaine:	10.04 bar
Tulistuminen ennen kompressoria:	0 K	Alijäähdytys:	0 K
Kiertoluku:	1.00 -	Lisälisjäähdytys:	0 K
Nesteen korkeus:	0 m	Kuumakaasun lämpötila:	69.3 °C
Järjestelmä ja putki:	Mäikkähöyrystin, painovoimainen kierto. Nesteputki		
Valintakriteerit:	Painehäviö: Oletus bar. Pituus: 10.00 m		



## Valinta: Teräsputki DIN-EN 100

Typpi	DIN-EN 65	DIN-EN 80	DIN-EN 100	DIN-EN 125	DIN-EN 150
NS	65	80	100	125	150
Paine-ero [bar]	0.004	0.002	0.000	0.000	0.000
Lämp. ero, kylä [K]	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Paine-ero [K/m]	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Nopeus, sisään [m/s]	0.70	0.51	0.30	0.20	0.14
Nopeus, ulos [m/s]	0.70	0.51	0.30	0.20	0.14

## Coolselector2





## Coolselector2



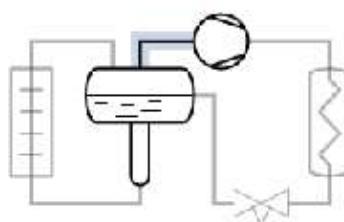
## Putkisto: Imuputki

## Käyttöolosuhteet

Kylmäaine:	R717	Putken massavirta:	5888 kg/h
Jäähdytysteho:	1836 kW	Lämmitysteho:	2103 kW
Höyrystyslämpötila:	-18.0 °C	Lauhtumislämpötila:	25.0 °C
Höyrystyspaine:	2.081 bar	Lauhtuspaine:	10.04 bar
Tulistuminen ennen kompressorin:	0 K	Alijäähdytys:	0 K
Kiertoluku:	1.00 -	Lisälisjäähdytys:	0 K
Nesteen korkeus:	0 m	Kuumakaasun lämpötila:	69.3 °C

**Järjestelmä ja putki:** Märkähöyrystin, painovoimainen kierto. Imuputki

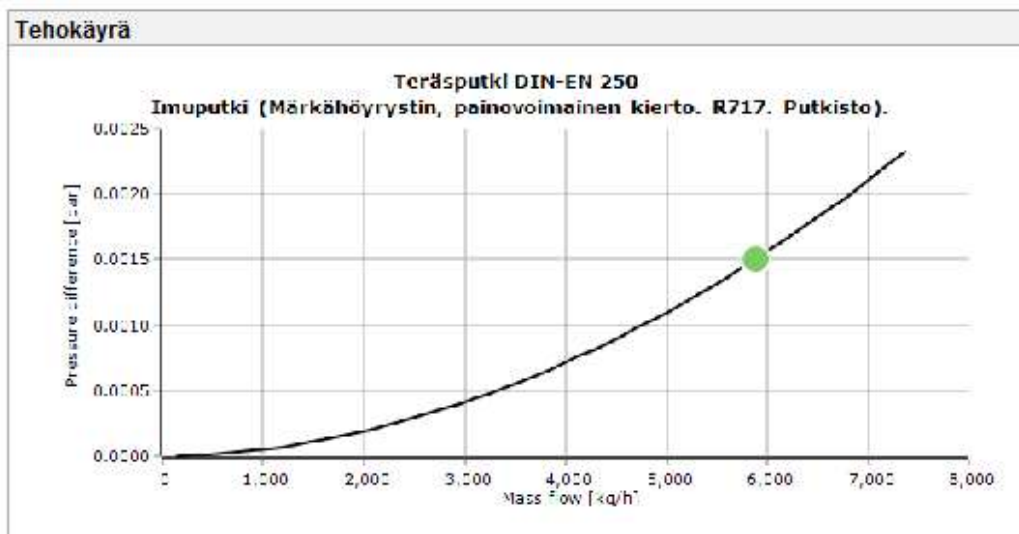
**Valintakriteerit:** Nopeus: 12.00 m/s. Pituus: 10.00 m



## Valinta: Teräsputki DIN-EN 250

Tyyppi	DIN-EN 150	DIN-EN 200	DIN-EN 250	DIN-EN 300	DIN-EN 350
NS	150	200	250	300	350
Paine-ero [bar]	0.019	0.005	0.002	0.001	0.000
Lämp. ero_kyll [K]	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
Paine-ero [k/m]	0.021	0.005	0.002	0.001	0.000
Nopeus, sisään [m/s]	47.01	27.98	17.59	12.44	10.34
Nopeus, ulos [m/s]	47.44	28.04	17.61	12.44	10.35

## Coolselector2



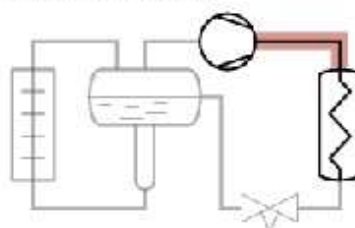
## Coolselector2



## Putkisto: Paineputki

## Käyttöolosuhteet

Kylmäaine:	R717	Putken massavirta:	5888 kg/h
Jäähdytysteho:	1836 kW	Lämmitysteho:	2103 kW
Höyrystyslämpötila:	-18.0 °C	Lauhtumislämpötila:	25.0 °C
Höyrystyspaine:	2.081 bar	Lauhtumispaine:	10.04 bar
Tulistuminen ennen kompressoria:	0 K	Alijäähdytys:	0 K
Kiertoluku:	1.00 -	Lisälisjäähdytys:	0 K
Nesteen korkeus:	0 m	Kuumakaasun lämpötila:	69.3 °C
Järjestelmä ja putki:	<i>Mäkähöyrystin, painovoimainen kierto. Paineputki</i>		
Valintakriteerit:	<i>Nopeus: 15.00 m/s. Pituus: 10.00 m</i>		



## Valinta: Teräsputki DIN-EN 150

Tyyppi	DIN-EN 100	DIN-EN 125	DIN-EN 150	DIN-EN 200	DIN-EN 250
NS	100	125	150	200	250
Paine-ero [bar]	0.039	0.014	0.005	0.001	0.000
Lämp. ero, kylä [K]	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Paine-ero [K/m]	0.013	0.004	0.002	0.000	0.000
Nopeus, sisään [m/s]	28.29	18.71	12.79	7.61	4.79
Nopeus, ulos [m/s]	28.40	18.73	12.79	7.61	4.79

## Coolselector2

