

Anna Pylkkänen

SÄDESAIRAALAN  
JÄÄHDYTYKSEN  
ENERGIATEHOKKUUDEN  
PARANTAMINEN

Opinnäytetyö  
Talotekniikka


Toukokuu 2010




**MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU**

Mikkeli University of Applied Sciences

## KUVAILULEHTI

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Opinnäytetyön päivämäärä	
Tekijä(t) Anna Pylkkänen		Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka LVI-tekniikan suuntautumisvaihtoehto	
Nimeke  Sädesairaalan jäähdytyksen energiatehokkuuden parantaminen			
Tiivistelmä  Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä sairaalarakennuksen jäähdytyksen energiankulutukseen ja tutkia jäähdytyksen energiatehokkuuden parantamista. Tavoitteena oli selvittää vapaajäähdytysjärjestelmän lisäämistä nykyiseen jäähdytysjärjestelmään.  Työn kohteena on Keski-Suomen sairaanhoitopiiriin kuuluva Sädesairaala. Sädesairaalan jäähdytys on toteutettu liuoslauhdutteisella vedenjäähdytyskoneella, jonka jäähdytysteho perustuu tällä hetkellä täysin kompressorijäähdytykseen. Tämä jäähdytysjärjestelmä kuluttaa paljon energiaa ja tässä työssä on tarkoitus selvittää kuinka paljon säästöjä saadaan aikaan lisäämällä vapaajäähdytys.  Työssä perehdytään yleisesti koneelliseen jäähdytysjärjestelmään sekä vapaajäähdytykseen. Tutkimuksen ohella tarkastellaan myös vedenjäähdytyskoneesta saatavan lauhdelämmön hyödyntämistä ilmastointikoneen tuloilman lämmittämiseksi sekä tutustutaan uudenlaiseen siirrinjärjestelmään, joka pystyy hyödyntämään myös lauhdelämpöä.  Uuden vapaajäähdytysjärjestelmän hankintakustannukset selvitettiin suunnitelman ja siitä saadun kustannusarvion perusteella. Energiankulutusta tutkittiin vertailemalla vapaajäähdytyksellä tuotettua jäähdytystä vedenjäähdytyskoneella tuotettuun jäähdytykseen.  Työn avulla saatiin energiankulutuksen ohella selville uuden järjestelmän hankintakustannukset, käyttökustannukset sekä mahdollinen takaisinmaksuaika. Tulosten avulla työn toimeksiantaja saa selkeän kokonaiskuvan jäähdytysjärjestelmän uudistamisesta.			
Asiasanat (avainsanat)  Vapaajäähdytys, jäähdytys, lämmöntalteenotto, lauhdelämpö, Econet®, energiatehokkuus			
Sivumäärä 27	Kieli Suomi	URN NBN:fi:amk-2010052210177	
Huomautus (huomautukset liitteistä)			
Ohjaavan opettajan nimi  Aki Valkeapää		Opinnäytetyön toimeksiantaja  Keski-Suomen sairaanhoitopiiri	

## DESCRIPTION

 <p><b>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU</b> Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis	
Author(s) Anna Pylkkänen		Degree programme and option Building Services Engineering HVAC-degree programme	
Name of the bachelor's thesis  Improving energy efficiency in hospital air cooling			
<p><b>Abstract</b></p> <p>The purpose of this Bachelor's thesis was to get acquainted with the cooling of a hospital building and examine how to improve the energy efficiency of cooling. The goal was to work out how to add free cooling system to the existing cooling system.</p> <p>This study deals with The Sädesairaala cancer hospital in Jyväskylä. The cooling of The Sädesairaala hospital is produced by a water-cooling unit with a liquid condensing that makes cool air with a refrigeration compressor. This cooling system uses a lot of energy. In this I wanted to work out how much energy would be saved by adding new free cooling system.</p> <p>The costs of a new free cooling system were worked out with an enterprise that gave a cost estimate about the work that the new system requires. The energy consumption was examined by comparing cooling with free cooling and cooling with water-cooling unit.</p> <p>The result of this thesis is a calculation including the energy consumption, the purchasing and operating costs and the pay-off period. With the results the decision makers of the hospital can get useful information about the renewal of the cooling system.</p>			
Subject headings, (keywords)  Free cooling, cooling, heat recovery, condensing heat, Econet®, energy efficiency			
Pages 27	Language Finnish	URN NBN:fi:amk-2010052210177	
Remarks, notes on appendices			
Tutor  Aki Valkeapää		Bachelor's thesis assigned by  Central Finland Health Care District	

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

$c_p$	veden ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg°C
$c_{p,II}$	propyleeniglykoli-vesiseoksen ominaislämpökapasiteetti, kJ/kg°C
COP	vedenjähdytyskoneen kylmäkerroin
I	investointikustannus, €
$E_k$	vuotuinen kylmäenergiantuotto, MWh/a
$E_L$	vuotuinen lauhde-energiantuotto, MWh/a
$E_{P1-P3}$	pumppujen P1-P3 vuotuinen sähköenergiankulutus, MWh/a
$E_s$	vuotuinen sähköenergiankulutus, MWh/a
n	takaisinmaksuaika, a
$P_k$	vedenjähdytyskoneen nimelliskylmäteho, kW
$P_s$	vedenjähdytyskoneen nimellissähköteho, kW
$P_{P1-P3}$	pumppujen P1-P3 nimellissähköteho, kW
S	nettosäästö, €/a
$q_{v,P1-P3}$	pumppujen P1-P3 tilavuusvirta, m <sup>3</sup> /s
t	vuotuinen käyntiaika, h/a
$\rho$	veden tiheys, kg/ m <sup>3</sup>

$\rho_{II}$  propyleeniglykoli-vesiseoksen tiheys, kg/ m<sup>3</sup>

$\Delta t$  lämpötilaero, °C

# SISÄLTÖ

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	1
2	TUTKIMUKSEN TAVOITTEET .....	2
3	NYKYTILANNE .....	2
4	JÄÄHDYTYKSEN JÄRJESTELMÄT .....	3
4.1	Suora ja välillinen jäähdytysjärjestelmä .....	3
4.2	Jäähdytysprosessi .....	4
4.2.1	Höyrytin .....	5
4.2.2	Kompressori .....	6
4.2.3	Lauhdutin .....	6
4.2.4	Paisuntaventtiili .....	6
4.3	Liuos- ja ilmalauhdutteinen jäähdytysjärjestelmä .....	7
5	VAPAAJÄÄHDYTYKSEN JÄRJESTELMÄT .....	8
5.1	Vapaa jäähdytyksen lisääminen liuoslauhdutteiseen järjestelmään .....	9
5.1.1	Vapaa jäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen ohjaus .....	11
5.2	Vapaa jäähdytyksen lisääminen ilmalauhdutteiseen järjestelmään .....	11
6	LAUHDELÄMPÖ JA ECONET® .....	12
6.1	Econet® energiajärjestelmä ja vedenjäähdytyskoneen lauhdelämmöntalteenotto .....	13
6.2	Järjestelmän komponentit .....	15
6.2.1	Järjestelmän toiminta lauhdelämmöntalteenotossa .....	16
7	SÄDESAIRAALAN VEDENJÄÄHDYTYSKONE .....	16
7.1	Vedenjäähdytyskoneen toimintaperiaate .....	16
8	AINEISTO JA MENETELMÄT .....	18
8.1	Mittaukset .....	18
8.2	Suunnittelu .....	19
8.3	Kustannusarvio .....	20
9	JÄÄHDYTYKSEN ENERGIAN KULUTUS .....	20
9.1	Vedenjäähdytyskone .....	20

9.2	Vedenjäähdytyskone ja vapaajähdytys.....	22
10	TULOKSET .....	25
11	POHDINTA .....	26

**LÄHTEET**

**LIITTEET**

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyössäni tutkin sairaalarakennuksen jäädytyksen energiatehokkuuden parantamista vapaajäähdytyksen avulla. Kyseessä on Keski-Suomen sairaanhoitopiiriin kuuluva Sädesairaala, jossa toimii mm. syöpätautien poliklinikka, sädehoito sekä syöpätautien vuodeosasto. Vuonna 1969 valmistuneen Sädesairaalan tilavuus on  $27\,695\text{ m}^3$  ja bruttoala  $6\,840\text{ m}^2$  /1/. Työn toimeksiantaja on Keski-Suomen sairaanhoitopiiri ja kohde sijaitsee Keski-Suomessa, Jyväskylän kunnan alueella Keski-Suomen keskussairaalan yhteydessä.

Sädesairaalan jäädytys on toteutettu liuoslauhdutteisella vedenjäähdytyskoneella, jonka jäädytysteho perustuu tällä hetkellä täysin kompressorijäädytykseen. Sairaalassa on paljon sisäisiä lämpökuormia, joiden vuoksi jäädytystä tarvitaan jopa ympäri vuoden. Tällaisessa tilanteessa voitaisiin ajatella vapaajäähdytyksen lisäämistä nykyiseen jäädytysjärjestelmään.

Työssäni tutkin vapaajäähdytyksen hankinta-, käyttö- ja kokonaiskustannuksia, sekä selvitän järjestelmän toteutettavuuden kyseiseen kohteeseen. Vertailukohtana käytän kohteen nykyistä tilannetta, jossa tarvittava kylmäenergia tuotetaan pelkästään vedenjäähdytyskoneella. Selvitän myös teoreettisella tasolla vedenjäähdytyskoneelta saatavan laudelämmön hyödyntämistä ilmastoinnin tuloilman lämmityksessä, sekä kerron yleisesti jäädytysprosessista ja erilaisista jäädytysjärjestelmistä.

Tavoitteena on saada aikaan selkeä kokonaiskuva vapaajäähdytysjärjestelmästä. Tutkimuksen avulla toimeksiantaja saa kattavan selvityksen järjestelmän mahdollisista kustannuksista ja niiden kautta saatavista säästöistä. Opinnäytetyöni aihe on juuri nyt ajankohtainen kiristyvien energiansäästönormien ja yleisen energiataloudellisuustrendin johdosta.



## 2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET

Opinnäytetyössä selvitetään vapaajäähdytyksen lisäämisen vaikutusta rakennuksen jäähdytyksen energiankulutukseen. Tavoitteena on selvittää ratkaisun kustannukset, mahdollinen energian säästö sekä toimivuus kohteessa. Tutkimuksessa selvitetään energian säästön ohella myös uuden järjestelmän tuomia rahallisia säästöjä. Tarkoituksena on selvittää järjestelmän hankintakustannukset, sekä sen jälkeiset käyttökustannukset, joissa mahdollinen taloudellinen hyöty saavutetaan.

Työn ohella tarkastellaan myös yleisesti jäähdytysprosessin kulkua sekä erilaisia jäähdytysjärjestelmiä. Tarkastelun avulla työstä saadaan aikaan kokonaisuus, josta selviää jäähdytykseen ja erityisesti vapaajäähdytykseen liittyvää teoriaa. Tutkimuksen rakenne kulkeekin teorian ja tulosten kautta pohdintaan, josta selviävät mahdolliset säästöt ja hyödyt.

## 3 NYKYTILANNE

Sädesairaalalla on tällä hetkellä käytössä koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä sekä jäähdytysjärjestelmä vedenjäähdytyskoneella. Vedenjäähdytyskoneen tuottama jäähdytysenergia syntyy kokonaan jäähdytyskompressorin tekemän työn avulla. Tämä kuluttaa paljon energiaa suuren jäähdytystehontarpeen vuoksi. Tarkoituksena olisi parantaa rakennuksen energiatehokkuutta ja saada aikaan säästöjä muuttamalla jäähdytysjärjestelmää.

Sädesairaala on osa suurempaa sairaalakokonaisuutta. Sairaalalla on käytössä neljä vedenjäähdytyskonetta, joissa on käytössä vapaajäähdytys. Niiden käytöstä on saatu positiivisia kokemuksia muutamien vuosien ajalta. Nyt tarkoituksena olisi lisätä vapaajäähdytysjärjestelmä myös Sädesairaalan osalle, jossa energiaa kuluttaa vanha vedenjäähdytyskone.

Sairaalarakennukset kuluttavat yleisesti paljon energiaa. Kulutukseen vaikuttavat mm. puhtaan sisäilman tuottaminen, rakennuksen lämmitys sekä erityisesti ympärivuotinen jäähdytys. Jäähdytyksen tarpeen aiheuttavat suuret sisäiset lämpökuormat, jotka aiheutuvat mm. laitteista, valaisimista sekä suurista ihmismääristä. Tämän vuoksi tiloja

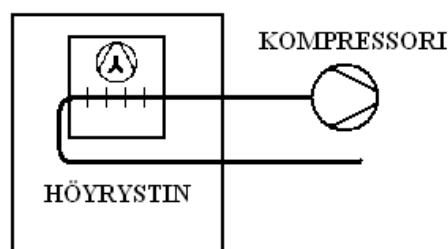
joudutaan jäähdyttämään normaalisti jopa ympäri vuoden. Vedenjäähdytyskone, jonka jäähdytysteho perustuu täysin jäähdytyskompressoriin, aiheuttaa suuret rahalliset kustannukset sairaalalle. Energian hinnan noustessa halutaan uudistaa järjestelmiä ja tässä tapauksessa vapaajäähdytyksen lisääminen vaikuttaa hyvältä ratkaisulta, erityisesti kun ollaan Suomen ilmasto-oloissa. Suomen viileä ilmasto mahdollistaa vapaajäähdytyksen käytön jopa yli puolet vuodesta.

## 4 JÄÄHDYTYS

Rakennusten jäähdytys voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Seuraavissa luvuissa kerrotaan muutamista yleisimmistä koneellisen jäähdytyksen muodoista sekä jäähdytysprosessista yleensä. Koneelliset jäähdytysjärjestelmät jaetaan yleensä kahteen eri pääryhmään; suoriin ja välillisiin jäähdytysjärjestelmiin. Molemmissa tapauksissa jäähdytysprosessi on peruseriaatteeltaan sama. Jäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa myös lauhdutuksen osalta kahteen eri ryhmään. Lauhdutus voidaan toteuttaa joko ilma- tai liuoslauhdutteisena.

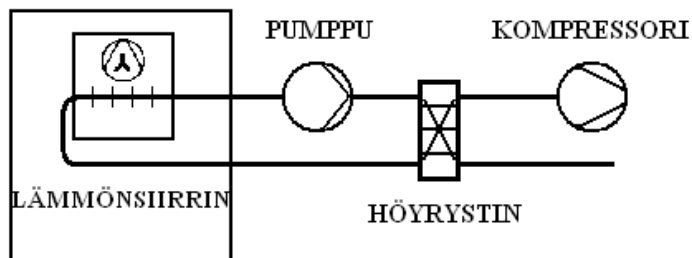
### 4.1 Suora ja välillinen jäähdytysjärjestelmä

Suorassa jäähdytysjärjestelmässä jäähdytyskoneen kylmäaine kiertää suoraan jäähdytettävässä elementissä, esimerkiksi ilmastointikoneen jäähdytyspatterissa. Suoraa jäähdytystä voidaan käyttää kun jäähdytystehontarve on alle 70kW ja jäähdytettäviä kohteita on vähän. Ratkaisun etuina ovat mm. korkea hyötysuhde, edulliset hankintakustannukset ja yksinkertaisempi rakenne. Toisaalta kylmäainetta tarvitaan enemmän kuin välillisessä jäähdytyksessä ja patterin ilmavirran tulee olla lähes vakio. Myöskään järjestelmän säädölle ei voida asettaa suuria vaatimuksia. /2, s.211–212; 3, s.11–13./



**KUVA 1. Suora jäähdytys.**

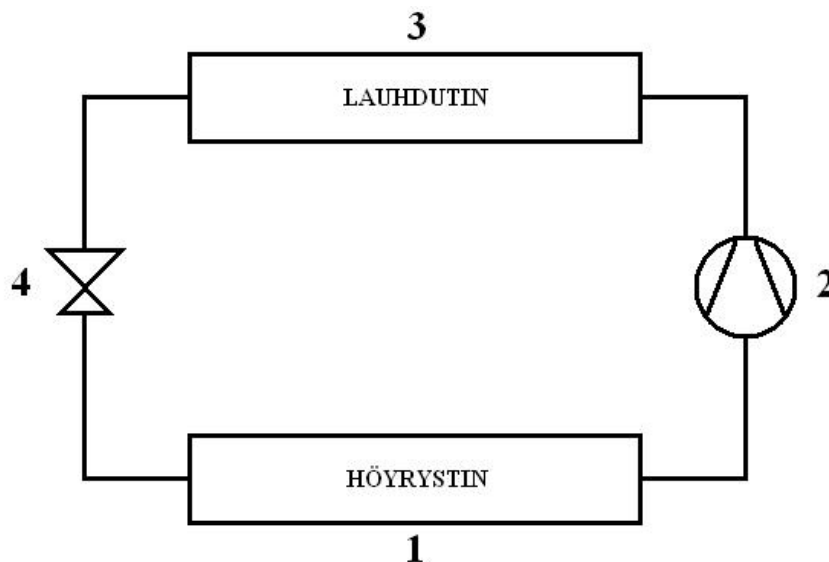
Välillisessä jäähdytysjärjestelmässä jäähdytyskoneen kylmäaine jäähdyttää väliainetta, esimerkiksi vettä, jolla suoritetaan varsinainen jäähdytystyö. Järjestelmän etuina ovat mm. helppo laajennettavuus ja huollettavuus. Sen avulla voidaan siirtää suurempia tehoja eikä jäähdytettävien kohteiden etäisyydelle konehuoneesta ole teknisiä rajoituksia. Järjestelmän avulla saavutetaan tarkka huonekohtainen säädettävyys ja se toimii myös tapauksissa, joissa jäähdytyskohteita on useita. Järjestelmällä on kalliimpi hankintahinta ja huonompi energiataloudellisuus, kuin suorassa järjestelmässä. /2, s.211–212; 3, s.15./



**KUVA 2. Välillinen jäähdytys.**

## 4.2 Jäähdytysprosessi

Koneellisen jäähdytyksen jäähdytysprosessi tapahtuu suljetussa kylmäaineen kiertoprosessissa, jossa kylmäaine vuoroin höyrystyy ja sitoo lämpöä ja vuoroin lauhtuu ja luovuttaa lämpöä. Kuva 3 havainnollistaa tämän kiertoprosessin. Höyrystimessä (1) kylmäaine sitoo lämpöä ympäristöstä ja höyrystyy ympäristöä matalammassa lämpötilassa. Kompressori (2) imee matalapaineisen kylmäainehöyryn korottaen sen paineen ja lämpötilan. Lauhduttimessa (3) kylmäprosessin sitoma lämpö siirtyy kylmäaineesta ympäristöön ja kylmäainehöyry nesteytyy eli lauhtuu. Lauhduttimelta palaavan kylmäaineen paine ja lämpötila alenee paisuntaventtiilissä (4) ennen kuin se virtaa höyrystimelle. /2, s.212; 4, s.205–206./



1. Höyrystin, lämmin ilma höyrystää kylmäaineen.
2. Kompressori, pumppaa kylmäaineen korkeaan paineeseen.
3. Lauhdutin, lämpö siirtyy kylmäaineesta ympäristöön.
4. Paisuntaventtiili, alentaa kylmäaineen paineen.

### KUVA 3. Kylmäkoneen toimintaperiaate.

Jäähdytettäessä ilmaa kompressorilla, syntyy aina myös lämpöä – lauhdelämpöä. Tämä lauhduttimesta ympäristöön poistettava lämpövirta on suurempi kuin höyrystimeen siirtynyt, eli jäähdytysprosessi tuottaa enemmän lämmintä kuin kylmää. Lauhduttimelta siirtyvä lämpö on teoriassa ”hukkalämpöä”, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi ilmastointikoneen tuloilman lämmityksessä erillisen lämmönsiirtimen ja tasaussäiliön avulla.

#### 4.2.1 Höyrystin

Höyrystimen tehtävä on höyrystää kylmäaine. Höyrystymisprosessi sitoo itseensä paljon lämpöä, joka luovutetaan lauhduttimessa. Höyrystymisessä on tärkeää, että kylmäaineen höyrystymislämpötila on alhaisempi kuin höyrystimen ympäristön lämpötila. Kylmäaineen on oltava täysin höyrystynyt ennen kuin se imetään kompressoriin. Neste kompressorissa aiheuttaisi todennäköisesti sen rikkoutumisen tai ainakin lyhentäisi sen käyttöikää. /5, s. 178–183./

### 4.2.2 Kompressor

Kompressorilla on kylmäainepiirissä kaksi päätehtävää. Kompressor korottaa kylmäaineen painetta ja lämpötilaa tuottaen samalla paine-eroa höyrystimen ja lauhduttimen välille, joka ylläpitää kylmäainevirtauksen kiertoprosessia. Kompressorin saapuvan kylmäaineen on oltava kokonaan höyrystynyt, etteivät nestemäisen kylmäaineen paineiskut aiheuta kompressorin ennenaikaista kulumista.

Kompressor voi olla joko hermeettinen tai puolihhermeettinen. Hermeettinen kompressor on täysin suljettu ja kaasutiivis rakenne, joka mahdollistaa hiljaisen käyntiäänien. Haittana suljetussa hermeettisessä kompressorissa on vikojen korjausmahdollisuuden puute. Puolihhermeettinen kompressor on osittain purettavissa ja lähinnä sen takia sitä käytetään suuremmilla jäähdytystehontarpeilla. /6, s.65–70./

Erilaisia kompressoreja ovat mm. mäntä-, kiertomäntä-, ruuvi-, turbo- ja kierukka- eli scroll-kompressor. Tämän tutkimuksen vedenjäähdytyskoneessa on käytössä puolihhermeettinen ruuvikompressor. Ruuvikompressorit ovat syrjäytysperiaatteella toimivia, jossa kahta rinnakkaista, erilaisin profiilein varustettua ruuvin muotoista kiertomäntää käytetään kammion sisällä vastakkaisiin suuntiin. Ruuvikompressor on venttiilitön ja pitkäikäinen staattisesti puristava kompressor. Pyörivä ruuvi tarvitsee runsaasti öljyä toimiakseen, joten se on varustettava öljynerottimella. /6, s. 65–70./

### 4.2.3 Lauhdutin

Lauhduttimen tehtävä kylmäainepiirissä on kylmäainehöyryn tiivistäminen nesteeksi, eli lauhduttaminen. Kylmäainehöyry virtaa lauhduttimeen, jossa se luovuttaa lämpöenergiaa lauhduttimen avulla ympäristöönsä. Kylmäainehöyryn jäähtyessä se samalla nesteytyy ja jatkaa matkaansa paisuntaventtiilille.

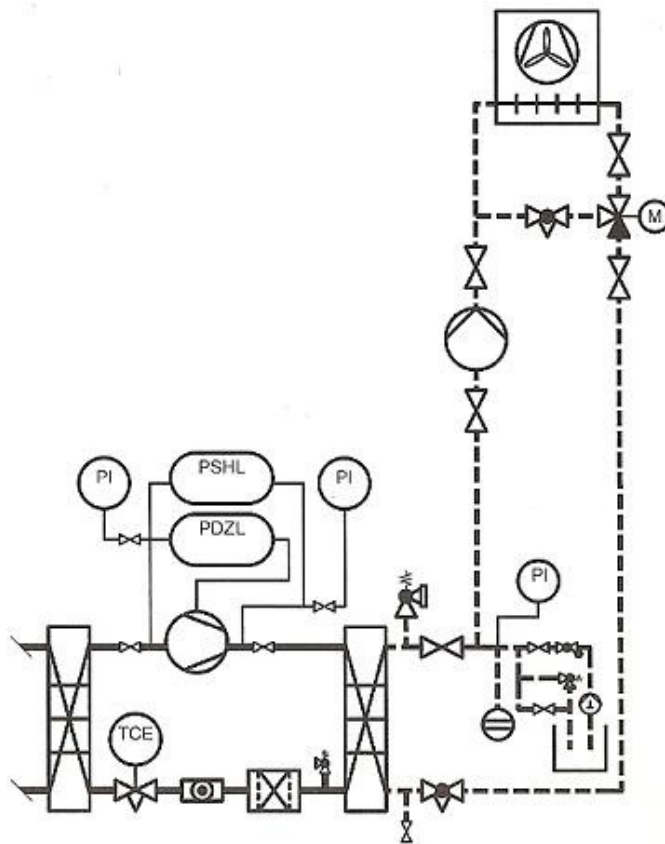
### 4.2.4 Paisuntaventtiili

Paisuntaventtiili on kylmäainepiirissä erottavana komponenttina korkea- ja matalapaineen välillä ja se on sijoitettu höyrystimen eteen. Sen tehtävä on laskea korkeapaineisen kylmäainenesteen painetta lasketaan,

se jäähtyy voimakkaasti. Paisuntaventtiilin tehtävänä on myös säädellä kylmäaineen virtausta kylmäainepiirissä, pitäen samalla kylmäprosessin hyötysuhde mahdollisimman korkealla. Jos lämpötila termostaattisessa paisuntaventtiilissä nousee liikaa, se avautuu ja päästää enemmän kylmäainetta höyrystimeen. Jos lämpötila taas laskee, termostaattinen paisuntaventtiili rajoittaa kylmäaineen virtausta. /5, s.226–230./

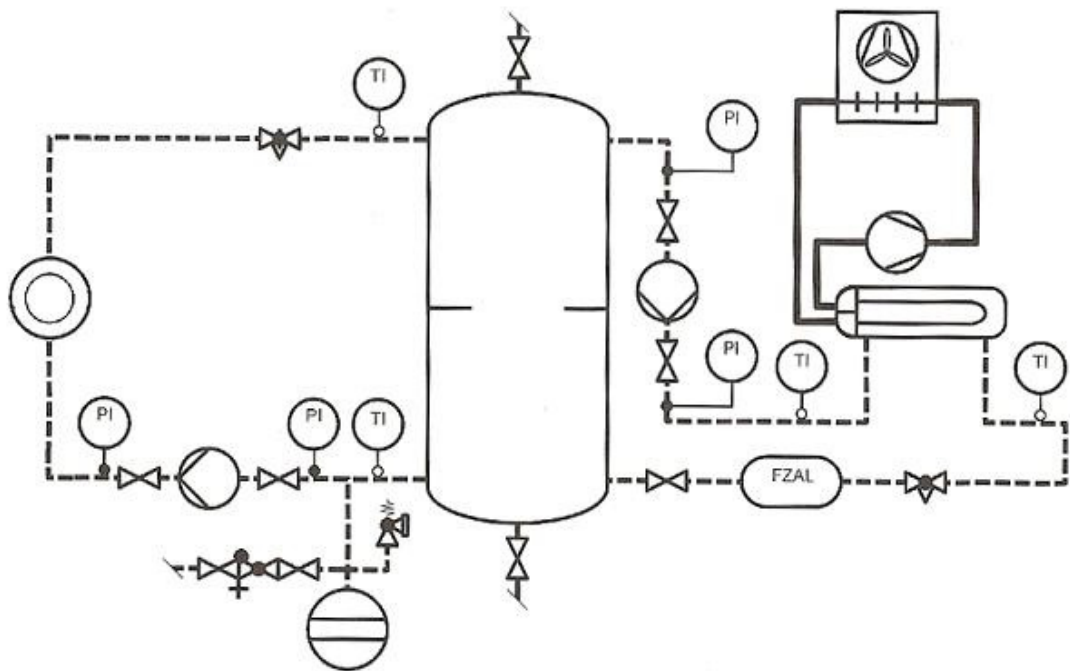
### 4.3 Liuos- ja ilmalauhdutteinen jäähdytysjärjestelmä

Liuoslahdutteisissa jäähdytyskoneissa käytetään erillistä lauhdutinpiiriä ja ulkoilmassa sijaitsevaa liuoslauhdutinta. Lauhdutinpiirissä kiertää kylmäliuos, esimerkiksi etyleeniglykoli-vesi seos, joka on tarpeen jäätymisen estämiseksi. Järjestelmän etuja ovat mm. pienempi kylmäaineen tarve sekä lauhdelämmön ja vapaajäähdytyksen hyödyntämisen mahdollisuus. Liuoslauhdutteisessa järjestelmässä kompressorin ja lauhduttimen välinen etäisyys voi myös olla huomattavasti pidempi kuin ilmalauhdutteisessa järjestelmässä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi äänekkään kompressorin sijoittamisen kellariin, kun lauhdutin voidaan vastaavasti sijoittaa katolle. /2, s.225–226./



KUVA 4. Liuoslauhdutteinen vedenjäähdytyskone. Muokattu /2 s.226/.

Ilmalauhdutteiset jäähdytyskoneet ovat pääosin kesällä käytettäviä. Koko jäähdytyskone voidaan sijoittaa ulkoilmaan, mutta tällöin on huomioitava höyrystimen mahdollinen jäätyminen käyttämällä kylmäliuosta veden sijaan. Jos ilmalauhdutteista jäähdytyskonetta aiotaan käyttää myös talvella, on huolehdittava ettei lauhtumispaine jää liian alhaiseksi ja heittele liikaa. Huonon lauhtumispaineen hallinnan takia laitteen hyötysuhde voi huonontua, kun paisuntaventtiilille virtaa kaasukuplia sisältävää kylmänestettä. /2, s.222–223; 6, s.71–75./



**KUVA 5. Ilmalauhdutteinen jäähdytyskone. Muokattu /2 s.229/.**

## 5 VAPAAJÄÄHDYTYS

Vapaajäähdytyksessä jäähdytysvesi jäähdytetään kylmällä ulkoilmalla, joka on ilmaista ja vapaasti käytettävissä. Tarpeen mukaan vapaajäähdytystä täydennetään jäähdytyskompressorilla.

Vapaajäähdytys on mahdollinen liuoslauhdutteisessa jäähdytyksessä kun ulkolämpötila on alhaisempi kuin vedenjäähdytyskoneelle palaava liuos. Ilmasta suoraan saatava jäähdytysteho alentaa tai jopa pysäyttää kokonaan kompressorin käynnin. Ulkolämpötilan laskiessa myös vapaajäähdytyksen osuus kasvaa jopa 100 % asti. Tuloksena saatiin

daan kylmää vettä lähes ilmaiseksi. Energiaa kuluttaa tällöin vain automatiikan ohjaamat puhaltimet sekä liuospumput. ”Energiankulutus pienenee läpi vuoden käytettävällä vapaajäähdytyksen ratkaisulla parhaimmillaan jopa 35 % - 75 % verrattuna perinteisiin” /7/.

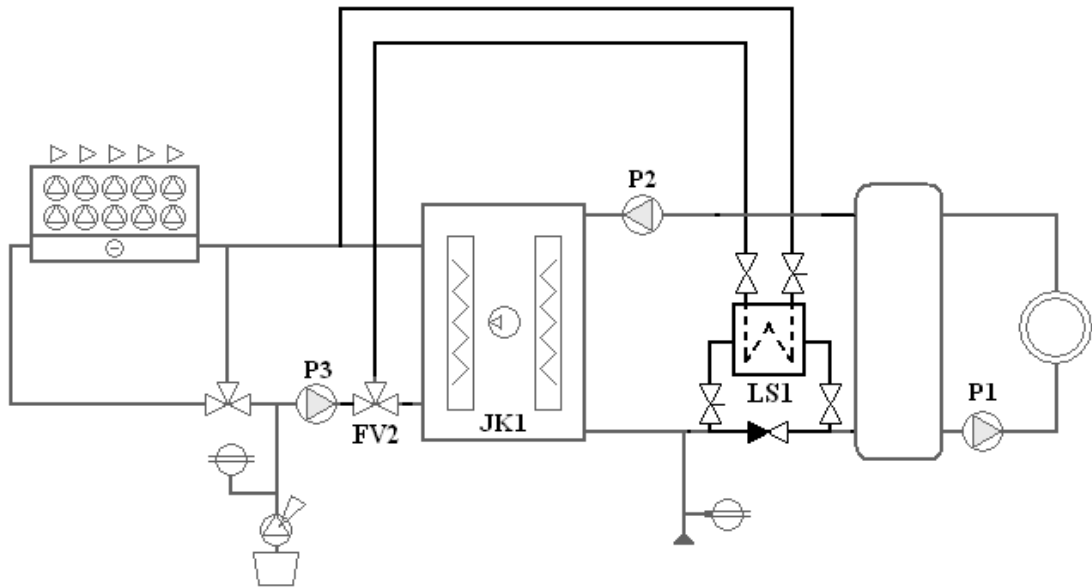
Vapaajäähdytyksessä voidaan hyödyntää nestejäähdyttimenä joko olemassa olevaa lauhdutinsiirrintä tai erillistä vapaajäähdytinsiirrintä, joka asennetaan ulkoilmaan. Erillinen vapaajäähdytinsiirrin tulee kyseeseen, jos käytössä on ilmalauhdutteinen jäähdytyskone. Ulkona nestejäähdyttimessä jäähtynyt liuos kierrätetään lämmönsiirtimelle, jossa liuos jäähdyttää suoraan kylmän veden. Kylmä vesi varastoi kylmän varaajasäiliöön. Siirtimeltä lähtevä liuos kiertää uudelleen nestejäähdyttimelle. Kun ulkoilmasta saatava vapaajäähdytysteho ei riitä kattamaan jäähdytystehontarvetta, kompressorilahtee käyntiin. Käytettäessä liuoslauhdutteista vedenjäähdytyskonetta, vapaajäähdytystä ja kompressorijäähdytystä ei voida käyttää yhtä aikaa, jos käytetään olemassa olevaa lauhdutinpiiriä vapaajäähdytyksen tuottamiseen. Vapaajäähdytyksen käyttö pidentää myös kompressorin käyttöikää, koska sen käyttöaste pienenee. /2, s.233-235./

### **5.1 Vapaajäähdytyksen lisääminen liuoslauhdutteiseen järjestelmään**

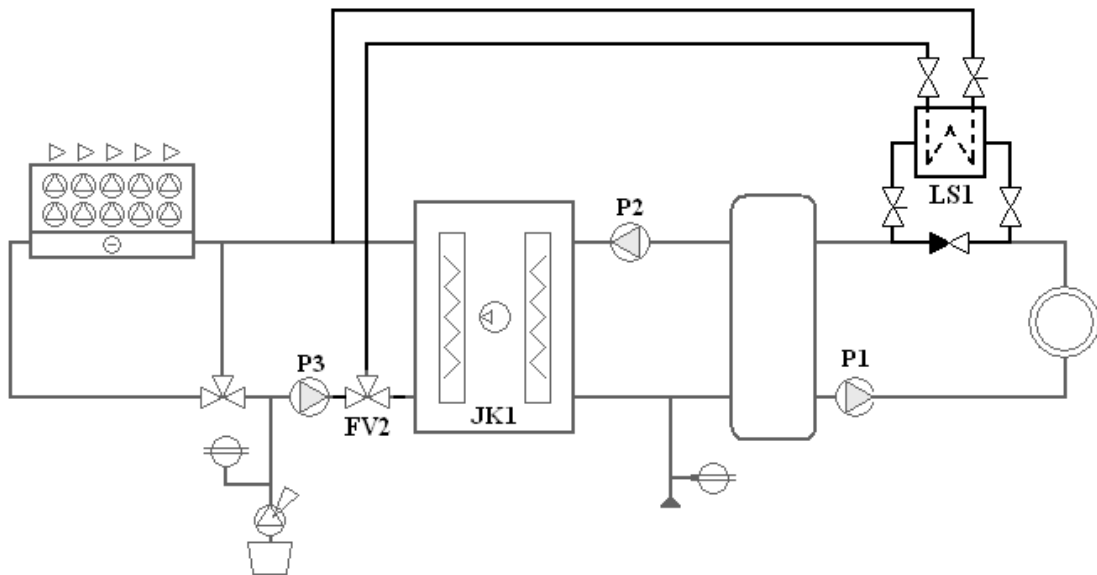
Vapaajäähdytys voidaan lisätä jo käytössä olevaan järjestelmään huolimatta siitä, onko kyseessä ilma- tai liuoslauhdutteinen jäähdytysjärjestelmä. Jos käytössä oleva järjestelmä on liuoslauhdutteinen, kuten tässä tutkimuksessa, voidaan suoraan hyödyntää jo olemassa olevan vedenjäähdytykoneen lauhdutinpiiriä ja nestejäähdytintä. Järjestelmään lisätään vain lämmönsiirrin, joka jäähdyttää jäähdytysvesiverkostoa.

Lämmönsiirrin voidaan sijoittaa joko vedenjäähdytyskoneen ja jäähdytysvesivaraajan väliin (kuva 6) tai jäähdytysverkoston paluulinjaan (kuva 7). Kun vapaajäähdytysiirrin LS1 liitetään jäähdytysverkoston paluulinjaan, voidaan hyödyntää jäähdytysvesiverkoston kiertopumppua P1 myös vapaajäähdytysiirtimellä LS1. Tällöin voidaan latauspumppu P2 sammuttaa vapaajäähdytyksen ajaksi ja saadaan aikaan säästöjä käyttökustannuksissa. Asentamalla vapaajäähdytysiirrin vedenjäähdytyskoneen ja jäähdytysvesivaraajan väliin joudutaan käyttämään myös latauspumppua P2.





**KUVA 6. Vapaajäähdytys liuoslauhdutteisen vedenjäähdytyskoneiston nestejäähdyttimellä, lämmönsiirrin LS1 sijoitettu vedenjäähdytyskoneen ja jäähdytysvesivaraajan väliin.**



**KUVA 7. Vapaajäähdytys liuoslauhdutteisen vedenjäähdytyskoneiston nestejäähdyttimellä, lämmönsiirrin LS1 sijoitettu jäähdytysvesiverkoston paluulinjaan.**

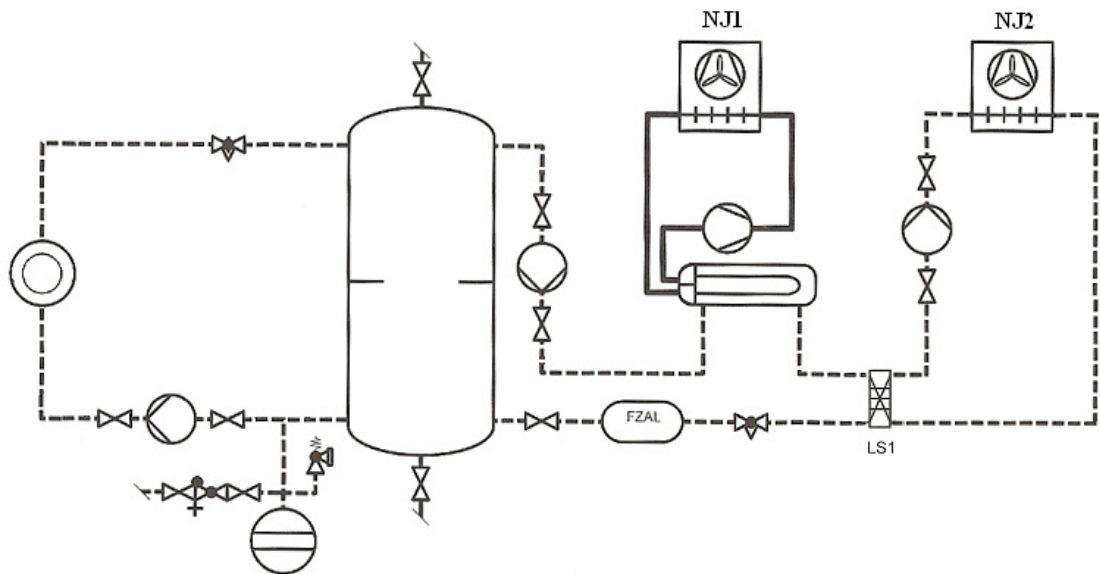
### **5.1.1 Vapaajäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen ohjaus**

Vapaajäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen toimintaa ohjataan automaatiojärjestelmällä. Automaatiojärjestelmä mittaa ulkolämpötilaa ja asetetussa rajalämpötilassa pysäyttää vedenjäähdytyskoneen. Tämän jälkeen kolmitieventtiili FV2 (kuva 6) ohjaa lauhdutinpiirin liuosvirran kulkemaan lämmönsiirtimelle LS1 (kuva 6). Liuosvirtaa ei kuitenkaan ohjata siirtimelle heti vedenjäähdytyskoneen pysähtymisen jälkeen, koska lauhdepiirin liuos on vielä lämmintä. Vasta liuoksen lämpötilan alennettua riittävästi automaatiikka avaa kolmitieventtiilin FV2. Kun ulkoilman lämpötila nousee yli asetusarvon, automaatiojärjestelmä ohjaa liuosvirran takaisin vedenjäähdytyskoneelle kolmitieventtiilin FV2 kautta ja käynnistää vedenjäähdytyskoneen. Kolmitieventtiilien sijaan voidaan myös käyttää moottoriläppäventtiilejä.

### **5.2 Vapaajäähdytyksen lisääminen ilmalauhdutteiseen järjestelmään**

Lisättäessä vapaajäähdytys ilmalauhdutteiseen järjestelmään tarvitaan aina erillinen nestejäähdytin (NJ2) lämmönsiirtimen (LS1) lisäksi. Nestejäähdytin jäähdyttää ulkoilmalla kylmäliuoksen ja lämmönsiirtimessä tämä kylmäenergia luovutetaan jäähdytysvesiverkostoon (kuva 8).

Vapaajäähdytystä ohjataan automatiikalla. Koska kompressorijäähdytystä ja vapaajäähdytystä voidaan käyttää samanaikaisesti (erillinen nestejäähdytin), niin vapaajäähdytystä voidaan käyttää hieman korkeammilla ulkolämpötiloilla, kuin liuoslauhdutteisissa järjestelmissä.



**KUVA 8. Vapaajäähdytys omalla nestejäähdyttimellä ilmalauhdutteisessa vedenjäähdytyskoneistossa. Muokattu /2, s.229/.**

## 6 LAUHDELÄMPÖ JA ECONET®

Kylmäprosessi tuottaa aina lämpöä. Lämpöä syntyy kylmäaineen puristustyön ja kompressorin sähkötyön seurauksena. Tämä lämpö täytyy puhaltaa esimerkiksi ulkoilmaan tai muuten siirtää lauhduttimesta pois. Lauhdelämpöä voidaan myös ottaa talteen ja hyödyntää rakennusten lämmityksessä. Suurena ongelmana lauhdelämmössä on kuitenkin se, että sitä on eniten tarjolla silloin, kun sitä vähiten tarvitaan, eli kesällä.

Yksinkertaisinta on sijoittaa lauhdutin lämmitettävään tilaan. Tällöin on varmistettava, että lauhduttimen lämpötila ei pääse nousemaan liian korkeaksi. Korkea lauhtumislämpötila huonontaa kylmäprosessin hyötysuhdetta. Lauhdutin voidaan sijoittaa myös ulkoilmaan ilmastointikoneen ilmanottoaukon eteen, jolloin ilmastointikoneen ilma ”esilämmittyy” lauhduttimella. Tämä on kannattavaa, jos kylmäkonetta käytetään vain talvisin. Kesäaikaan lauhdutin lämmittää turhaan tuloilmaa. Jos lauhdelämpöä aioitaan hyödyntää suurissa määrissä ja ympäri vuoden, voidaan lauhdutuspiiriin liittää lämmönsiirrin ja varaaja. Lämmönsiirtimen avulla voidaan lauhdepiirin lämpöä siirtää varaajaan, joka toimii tasaussäiliönä. Lauhdelämmöntalteenoton yksi ongelma on

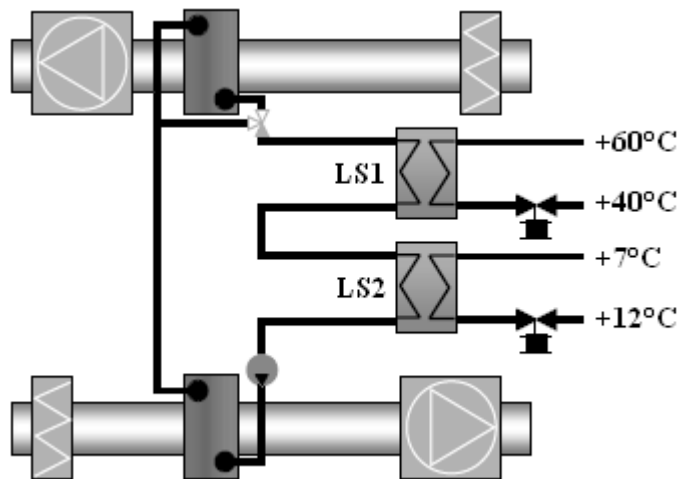
lämmön saannin epätasaisuus, joka johtuu kylmäkoneen katkonaisesta käynnistä. Edelleen lauhdelämmön lämpötilataso on matala ja hyödyntäminen rajallista.

Sädesairaalassa lämpökuormia on runsaasti myös talvella ja siten lauhdelämmön käyttö, esimerkiksi tuloilman lämmityksessä, olisi perusteltua. Lauhdelämmön hyödyntämiseen sellaisenaan tarvitaan ilmastointikoneisto sekä lämmönsiirrin, joka voi hyödyntää matalia lämpötiloja tuloilman lämmityksessä. Yksi tällainen järjestelmä on FläktWoods Oy:n Econet® energiajärjestelmä.

### **6.1 Econet® energiajärjestelmä ja vedenjäähdytyskoneen lauhdelämmöntalteenotto**

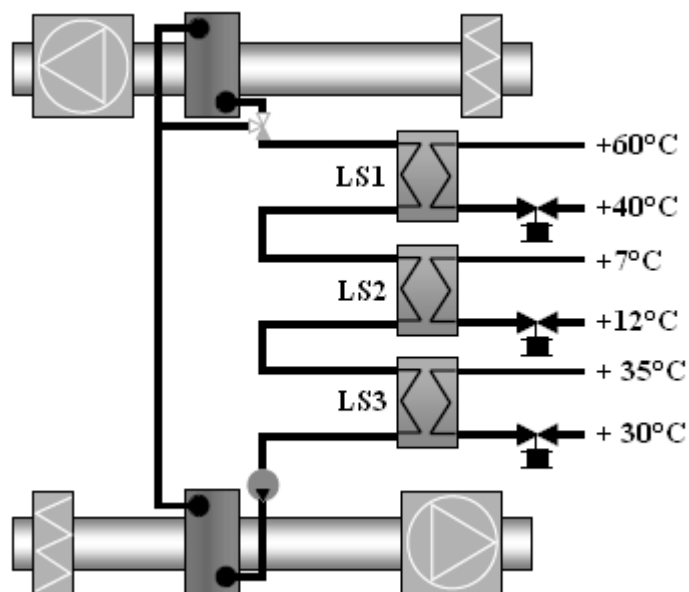
Sädesairaalalla on tällä hetkellä käytössä FläktWoods Oy:n hygieniamallin ilmastointikone EU2000. Jotta lauhdelämpöä pystyttäisiin hyödyntämään, tulisi ilmastointikoneeseen lisätä uusi lämmönsiirrin. Yhtenä vaihtoehtona olisi FläktWoods Oy:n Econet® energiajärjestelmä. Keski-Suomen Keskussairaalalla on jo ennestään kokemusta Econet® järjestelmästä mm. aiemmin rakennetulla sairaalan F-osan laajennuksella.

Econet® järjestelmällä ilmastointikoneen lämmöntalteenotto, kylmäntalteenotto, lämmitys ja jäähdytys hoidetaan yhdellä järjestelmällä. Järjestelmä on EU/EQ konesarjan toimintoyksikkö, jossa kaikki ilmankäsittelytoiminnot on integroitu yhteen neste-putkeen. Tulo- ja poistoilmakoneiden välillä on normaali nestekierto lämmöntalteenotto, johon on lisätty lämmitys- ja jäähdytyssiirtimet ja kylmäntalteenotto. Näiden siirtimien avulla voidaan piirissä kiertävän nesteen lämpötilaa muuttaa haluttuun arvoon. Valmistaja lupaa järjestelmälle hyvän, jopa 70 % lämmöntalteenottoasteen. /8./



**KUVA 9. Econet® toimintakaavio yleisillä mitoituslämpötiloilla. Muokattu /8/.**

Econet® järjestelmän avulla voidaan myös hyödyntää vedenjäähdytyskoneen lauhdelämpöä (kuva 8). Perinteisesti vedenjäähdytyskoneen nestekiertoista lauhdutinlämpöä ei voida hyödyntää sen matalan lämpötilan vuoksi (30-38°C). Econet® järjestelmä pystyy hyödyntämään tätä ns. hukkalämpöä tuloilman lämmittämiseen, koska Econet® järjestelmällä käytetään tehokkaampia pattereita ja siten matalampia lämpötiloja. /9./



**KUVA 10. Econet® toimintakaavio yleisillä mitoituslämpötiloilla ja lauhdelämpölämmön talteenotoksiirrin LS3. Muokattu /8/.**

## 6.2 Järjestelmän komponentit

Econet® kokonaisuus käsittää tulo- ja poistoilmayksikköön sijoitettavat energiansiirtopatterit sekä tehdasvalmisteisen pumppuryhmän.

Järjestelmässä käytetään tehokkaita pattereita, minkä ansiosta lämpötilaerot nesteen ja ilman välillä ovat pieniä. Tämän avulla voidaan hyödyntää matalalämpöisiä lämmitysenergioita tai saavuttaa suuria lämpötilaeroja lämmitys- ja jäähdytysnesteelle.

Pumppuryhmä toimitetaan valmiina kokonaisuutena. Se sisältää toiminnan ja tiedon siirron kannalta tarvittavat laitteet kuten säätimen, virtaussäätisen pumpun sekä tarvittavat anturit ja mittarit. Lämmönsiirtonesteena pumpuissa käytetään tehdasvalmisesta etyleenigykoli-vesiseosta, jonka pitoisuus Jyväskylässä ja sen pohjoispuolella on 35 % /8; 9/



**KUVA 11. Econet® pumppuryhmä ja lämmönsiirtimet /8/.**

### **6.2.1 Järjestelmän toiminta lauhdelämmöntalteenotossa**

Lauhdelämpöä voidaan hyödyntää Econet® järjestelmässä, kun lämmöntalteenotto ei enää riitä täyttämään tuloilman lämmityksen vaatimaa energia määrää. Normaalisti Econet® järjestelmässä on lämmityssiirrin LS1, joka hoitaa tuloilman lämmityksen lämmöntalteenoton ohella. Lauhdelämpöä käytettäessä, asennetaan Econet® piiriin kolmas lämmönsiirrin LS3. /8./

Lauhdelämmöntalteenotto tilanteessa järjestelmä toimii normaalin nestekiertoisen rekuperatiivisen lämmöntalteenoton tapaan. Kun lämpöenergiaa ei enää saada riittävästi lämmöntalteenotosta, automatiikka päästää lauhdelämpöliuoksen kiertämään lauhdelämmönsiirtimen LS3 kautta. Econet® ohjauskeskus säätää lisälämmityksen määrää ja kiertopumpun pyörimisnopeutta pitäen samalla lämmöntalteenottoasteen mahdollisimman korkealla. /8./

## **7 SÄDESAIRAALAN VEDENJÄÄHDYTYSKONE**

Tässä luvussa käsitellään Sädesairaalan vedenjäähdytyskoneita ja sen toimintaa.

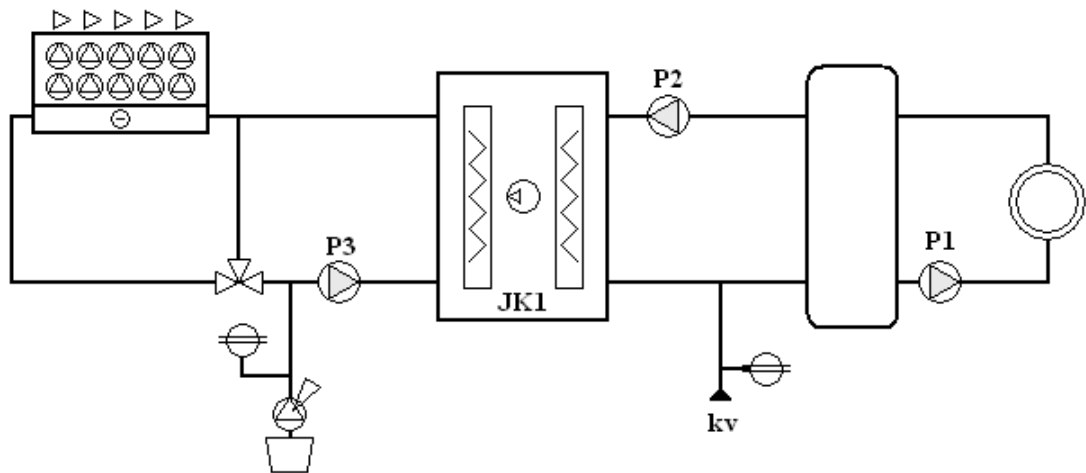
### **7.1 Vedenjäähdytyskoneen toimintaperiaate**

Jäähdytyskoneen höyrystimessä kylmäaine höyrystyy ja sitoo lämpöä höyrystimen läpi virtaavasta vedestä, jolloin vesi jäähtyy. Höyrystimen läpi virtaava vesi kulkee varaajasäiliöön. Koska jäähdytyskone käy vakioteholla ja tarvittava jäähdytysteho on pienempi kuin jäähdytyskoneen kylmäteho, niin jäähdytyskone käy katkonaisesti ja kylmää vettä ei saada tasaisesti. Kylmäntuoton vaihtelusta johtuen käytetään varaajaa (tasaussäiliö) tasaamaan koneen katkonaisesta käynnistä aiheutuvat vaihtelut. Käyntiaikaa säätelemällä ja varastoimalla kylmä varaajaan, saadaan käyttöön haluttu jäähdytysteho. Varaajasta kylmä jäähdytysvesipiiriin vesi ohjautuu jäähdytyspalkeille.

Jäähdytyskone on liuoslauhdutteinen, eli siinä on erillinen nestejäähdytin, joka siirtää lauhdepiiriin lämpöä ulkoilmaan. Nestejäähdytin on sijoitettu Sädesairaalan katolle.

Nestejäähdyttimessä on erilliset puhaltimet, jotka lisäävät nestejäähdyttimen jäähdytystehoa imemällä ulkoilmaa jäähdyttimen läpi.

Jäähdytysverkoston, kylmävaraajan ja lauhdutuspiirin pumpput ovat taajuusmuuttajaohjattuja. Jäähdytysverkoston pumppu P1 (kuva 9) on asennettu verkoston menopuolelle siirtämään kylmää vettä varaajasäiliöltä jäähdytyspalkeille. Latauspumpulla P2 ylläpidetään varaajasäiliön ja vedenjäähdytyskoneen välistä kiertoa. Pumppu on asennettu varaajan paluupuutkeen. Lauhdutinpiirin pumppu P3 on myös asennettu paluupuolelle. Pumppu kierrättää lauhdutinpiirin kylmäliuosta vedenjäähdytyskoneen ja nestejäähdyttimen välillä.



**KUVA 12. Sädesairaalan vedenjäähdytyskone VJK1**

**TAULUKKO 1. Sädesairaalan vedenjäähdytyskone.**

Tyyppi	Carrier 30HXC110-A901-FEE
Jäähdytysteho	378 kW
Jäähdytyvesi	+7 °C/+12 °C
Lauhdutusvesi	+30 °C /+35 °C
Kylmäainetäytös	R-134a 1/31 kg ja 2/35 kg
Sähköteho	84kW
Käyttöjännite	400V 3~50Hz



## 8 AINEISTO JA MENETELMÄT

Työssä selvitetään kylmäkoneen vuosittainen energiankulutus vedenjäähdytyskoneen käyntiajan perusteella. Kulutukseen lisätään pumppujen kuluttama sähköteho. Vapaa-jäähdytyksen käytettävyys vuoden aikana saadaan ulkoilman lämpötilojen avulla ulkoilman lämpötilojen pysyvyystiedoista. Vapaa-jäähdytyksen käyttömahdollisuuden perusteella lasketaan, kuinka paljon energiaa säästetään, kun vapaa-jäähdytyksen aikana vedenjäähdytyskonetta ei tarvitse käyttää. Rahalliset säästöt saadan selville kun tarkastellaan energiasäästöä sekä sähkön hintaa. Uuden järjestelmän kustannukset selviävät tarjousten perusteella. Edellä mainitut selvitykset esitellään tässä luvussa.

### 8.1 Mittaukset

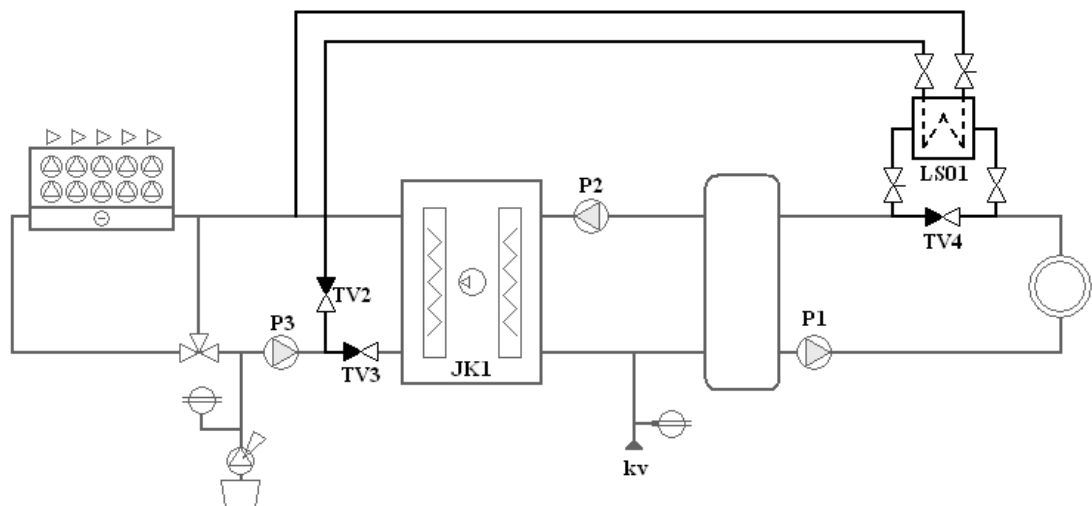
Vedenjäähdytyskoneen käyntiajat mitattiin yhden vuorokauden aikana kun ulkoilman lämpötila oli  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Mittausten mukaan vedenjäähdytyskone käy päivällä (klo 8-16) 7 minuuttia ja seisoo 7 minuuttia. Illalla ja yöllä (klo 16-8) vedenjäähdytyskone käy 4 minuuttia ja seisoo 10 minuuttia.

Mittausten mukaan vedenjäähdytyskoneen viikottainen käyntiaika on 60 tuntia ja vuotuinen 3120 tuntia. Kone käy aina vakioteholla. Käyntiaikaa säätelemällä ja varaajaa käyttämällä saadaan aikaan tarvittava jäähdytysteho. Tässä työssä päätettiin käyttää yhden vuorokauden aikana saatuja käyntiaikoja koko vuoden käyntiaikojen selvittämiseen, koska tarkempien käyntiaikojen selvittäminen olisi vaatinut vuoden seurannan, mikä ei tässä työssä ollut mahdollista. Toimeksiantajan mielestä vuorokauden mittainen seuranta antaa riittävän tarkkuuden vedenjäähdytyskoneen vuotuiselle käyntiajalle.

## 8.2 Suunnittelu

Vapaajäähdytysjärjestelmän suunnittelu lähti liikkeelle nykyisen jäähdytysjärjestelmän kartoituksesta ja siihen tarvittavien muutosten selvittämisestä.

LVI-suunnittelija teki suunnitelman, johon mitoitettiin lämmönsiirrin, putket ja säätöventtiilit. Laitteiden sijoituspaikat käytiin katsomassa paikan päällä. Siirrin päätettiin sijoittaa jäähdytysverkoston puolelle, jolloin hyödynnetään jäähdytysverkoston kiertopumppua P1 (kuva 13). Tällöin nestevaraajan ja vedenjäähdytyskoneen välinen latauspumppu P2 voidaan vapaajäähdytystilanteessa pysäyttää kokonaan ja saadaan aikaan lisää säästöjä. Vapaajäähdytyksen putkikytkennät on esitetty kuvassa 13. Kolmitieventtiilin sijaan nestevirtojen ohjaus suoritetaan moottoriläppäventtiileillä (TV2, TV3) rajakytkimin. Liitteessä 1 esitetään suunnittelijan piirtämä suunnitelma.



JK1	Vedenjäähdytyskone
P1 – P3	Kiertopumput
LS01	Lämmönsiirrin
TV2 – TV4	Moottoriläppäventtiilit

**KUVA 13. Vedenjäähdytyskone VJK1 ja vapaajäähdytyksen lisäys, yksinkertaistettu.**

### 8.3 Kustannusarvio

Suunnitelmien perusteella pyydettiin kustannusarvio järjestelmän putki-, automaatio- ja sähkötoista /10/. Muutoksen aiheuttamille rakennustöille arvioitiin kokemusten perusteella keskimääräinen hinta, 5 000 € (alv 0 %). Järjestelmän mahdollisia huoltokustannuksia ei tässä oteta huomioon, sillä niiden ennustaminen on lähes mahdotonta. Nykyinen vedenjäähdytyskone huolletaan vuosittain, jolloin samaan huoltoon voidaan lisätä vapaajäähdytysjärjestelmän huoltotoimet.

Suunnitelmien mukaisten putki-, automaatio- ja sähkötoiden hinnaksi muodostui 14 500 € (alv 0 %). Kustannusarvio kattaa kaikki putki-, automaatio- ja sähkötyöt järjestelmän saattamiseksi täyteen toimintakuntoon. Kun lisätään saatuun kustannusarvioon arvioidut rakennuskustannukset, saadaan kokonaishinnaksi muutostöille 19 500 € (alv 0 %).

## 9 JÄÄHDYTYKSEN ENERGIAN KULUTUS

Vedenjäähdytyskoneen vuotuiseksi käyntiajaksi arvioitiin 3120 tuntia, joka perustuu yhden vuorokauden mittaiseen seurantaan. Kompressorin lisäksi sähköä kuluttavat pumput. Pumppujen kulutus lasketaan niiden nimellistehojen ja vuotuisten käyntiaikojen avulla. Pumppujen kuluttama teho vaihtelee todellisuudessa nimellistehon molemmin puolin. Tässä nimellistehoa käytetään, koska todellista kulutusta ei voida selvittää ilman pitkäkestoisia mittauksia. Puhaltimien kulutus on sama riippumatta käytetäänkö kompressori vai vapaajäähdytystä.

### 9.1 Vedenjäähdytyskone

Vuotuisen laskennallisen käyntiajan ja nimellissähkötehon avulla saadaan vedenjäähdytyskoneen vuotuinen sähköenergiankulutus

$$E_s = P_s \cdot t = 84 \text{ kW} \cdot 3120 \text{ h/a} = 262080 \text{ kWh/a} = 262 \text{ MWh/a} \quad (1)$$

Vedenjäähdytyskoneella tuotettu kylmäenergia saadaan koneen vuotuisen käyntiajan ja nimelliskylmätehon avulla

$$E_k = P_k \cdot t = 378 \text{ kW} \cdot 3120 \text{ h/a} = 1179360 \text{ kWh/a} = 1179 \text{ MWh/a} \quad (2)$$

Koneen kylmäkertoimeksi saadaan

$$\text{COP} = \frac{1179 \text{ MWh/a}}{262 \text{ MWh/a}} = 4,5 \quad (3)$$

Jäähdytysvesiverkoston kiertopumpun P1 vuotuinen käyntiaika saadaan laskettua pumpun nimellisvirtaaman ja lämpötilaeron avulla tuotetusta kylmäenergiasta

$$t_{P1} = \frac{E_k}{q_{v,P1} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t} = \frac{1179360 \text{ kWh/a}}{0,0171 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 5^\circ\text{C}} = 3284 \text{ h/a} \quad (4)$$

Jäähdytysvesiverkoston kiertopumpun P1 kuluttama sähköteho saadaan lasketusta pumpun vuotuisesta käyntiajasta ja nimellistehosta

$$E_{P1} = P_{P1} \cdot t_{P1} = 4,0 \text{ kW} \cdot 3284,2 \text{ h/a} = 13136,8 \text{ kWh/a} = 13 \text{ MWh/a} \quad (5)$$

Myös vedenjäähdytyskoneen ja kylmävesivaraajan välisen latauspumpun P2 vuotuinen käyntiaika saadaan selville pumpun nimellisvirtaaman ja lämpötilaeron avulla kylmäenergian tuotosta

$$t_{P2} = \frac{E_k}{q_{v,P2} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta t} = \frac{1179360 \text{ kWh/a}}{0,0171 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 5^\circ\text{C}} = 3284 \text{ h/a} \quad (6)$$

Latauspumpun P2 kuluttama sähköteho saadaan pumpun vuotuisesta käyntiajasta ja nimellistehosta

$$E_{P2} = P_{P2} \cdot t_{P2} = 4,0 \text{ kW} \cdot 3284,2 \text{ h/a} = 13136,8 \text{ kWh/a} = 13 \text{ MWh/a} \quad (7)$$

Lauhdepiirin kiertopumpun P3 vuotuinen käyntiaika saadaan selville pumpun nimellisvirtaaman ja lämpötilaeron avulla lauhde-energian tuotosta. Vedenjäähdytyskoneen tuottama lauhdeteho voidaan selvittää laskemalla yhteen vedenjäähdytyskoneen kulut-

tama sähköteho ja sen tuottama kylmäteho. Näin ollen lauhde-energia voidaan laskea vedenjäähdytyskoneen kuluttaman sähköenergian ja sen tuottaman kylmäenergian avulla.

$$E_L = E_s + E_k = 262080 \text{ kWh/a} + 1179360 \text{ kWh/a} = 1441440 \text{ kWh/a} = 1441 \text{ MWh/a} \quad (8)$$

$$t_{P3} = \frac{E_L}{q_{v,P3} \cdot \rho_{ll} \cdot c_{p,ll} \cdot \Delta t} = \frac{1441440 \text{ kWh/a}}{0,0189 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1012 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,915 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 6^\circ\text{C}} = 3208 \text{ h/a} \quad (9)$$

Lauhdepiirin pumpun P3 kuluttama sähköteho saadaan pumpun vuotuisesta käyntiajasta ja nimellistehosta

$$E_{P3} = P_{P3} \cdot t_{P3} = 5,5 \text{ kW} \cdot 3208 \text{ h/a} = 17644 \text{ kWh/a} = 18 \text{ MWh/a} \quad (10)$$

Taulukossa 2 esitetään yhteenveto vedenjäähdytyskoneen ja pumppujen energiankulutuksista, käyttöajoista sekä kustannuksista vuoden aikana. Sähkön hintana laskelmissa on käytetty 48,90 €/MWh.

## TAULUKKO 2. Jäähdytys vedenjäähdytyskoneella.

	Käyntiaika h/a	Kulutus MWh/a	Kustannus €/a
Vedenjäähdytyskoneen kompressori	3120	262	12812
Jäähdytysverkoston kiertopumppu P1	3284	13	636
Jäähdytysvaraajan kiertopumppu P2	3284	13	636
Lauhdutuspiirin kiertopumppu P3	3546	18	880
Yhteensä			14963

## 9.2 Vedenjäähdytyskone ja vapaajäähdytys

Vapaajäähdytys voidaan ottaa käyttöön, kun ulkoilman lämpötila on noin +5 °C tai sen alle. Kun ulkoilman lämpötila on alle +5 °C, sammuu vedenjäähdytyskoneen kompressori ja vedenjäähdytyskoneen ja varaajan välinen kiertopumppu P2. Asetusarvo +5°C perustuu sairaalan muiden osien vapaajäähdytysjärjestelmistä saatuihin kokemuksiin. Toisaalta vasta valmis järjestelmä näyttää pystytäänkö vapaajäähdytys todellisuudessa aloittamaan kyseisessä lämpötilassa.

Tässä työssä ulkoilman lämpötilan pysyvyyttä tarkastellaan ympäristöministeriön julkaiseman monisteen /11/ ulkoilman lämpötilojen pysyvyystietojen avulla. Ulkoilman lämpötilasta lasketut pysyvyystiedot perustuvat Ilmatieteenlaitoksen testivuoden 1979 tietoihin. Taulukoimalla Jyväskylän lämpötilatiedot, saadaan selville kuinka monta tuntia vuodesta on +5 °C tai sen alle (LIITE 2).

Käyttämällä Jyväskylän ulkolämpötilojen pysyvyystietoja, saadaan selville, että 5168 tuntia vuodessa ulkoilman lämpötila on alle +5 °C. Tämä on noin 59 % vuodesta. Vedenjäähdytyskoneen vuotuisesta käyntiajasta voidaan laskea suoraan 41 %, joka vastaa aikaa, jolloin kone käy uuden vapaajäähdytysjärjestelmän ollessa asennettuna

$$3120\text{h/a} \cdot 0,41 = 1279\text{h/a} \quad (11)$$

Kun käytetään vapaajäähdytystä, vedenjäähdytyskoneen vuotuisen laskennallisen käyntiajan sekä nimellissähkötehon avulla voidaan laskea vuotuinen sähköenergiankulutus

$$E_s = P_s \cdot t = 84\text{kW} \cdot 1279\text{h/a} = 107436\text{kWh/a} = 107\text{MWh/a} \quad (12)$$

Vedenjäähdytyskoneen vuotuinen kylmäenergiantuotto on tällöin

$$E_k = P_k \cdot t = 378\text{kW} \cdot 1279\text{h/a} = 483462\text{kWh/a} = 483\text{MWh/a} \quad (13)$$

Jäähdytysvesiverkoston kiertopumpun P1 toimintaan ei vaikuta vapaajäähdytyksen käyttö. Verkostoa on ylläpidettävä samalla tavalla, kuin tilanteessa, jossa käytetään ainoastaan vedenjäähdytyskonetta. Näin ollen pumpun P1 kulutus on sama kuin aiemmin on laskettu eli 13 MWh/a.

Vedenjäähdytyskoneen ja kylmävesivaraajan välinen pumppu P2 käy ainoastaan silloin, kun vedenjäähdytyskonekin käy. Sen vuotuinen käyntiaika on

$$t_{P2} = \frac{E_k}{q_{v,P2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot \Delta t} = \frac{483462\text{kWh/a}}{0,0171\text{m}^3/\text{s} \cdot 1000\text{kg}/\text{m}^3 \cdot 4,2\text{kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} \cdot 5^\circ\text{C}} = 1346\text{h/a} \quad (14)$$

Pumpun P2 kuluttama sähköteho vastaavasti

$$E_{P2} = P_{P2} \cdot t_{P2} = 4,0 \text{ kW} \cdot 1346 \text{ h/a} = 5384 \text{ kWh/a} = 5 \text{ MWh/a} \quad (15)$$

Lauhdepiirin kiertopumpun P3 vuotuinen käyntiaika saadaan pumpun nimellisvirtaaman ja lämpötilaeron avulla lauhde-energian tuotosta ja vapaajähdytyksessä siirrettävän energian ja lämpötilaeron avulla.

$$E_L = E_s + E_k = 107406 \text{ kWh/a} + 483462 \text{ kWh/a} = 590868 \text{ kWh/a} = 591 \text{ MWh/a} \quad (16)$$

Pumpun P3 vuotuinen käyntiaika kompressorijähdytyksessä

$$t_{P3} = \frac{E_L}{q_{v,P3} \cdot \rho_{ll} \cdot c_{p,ll} \cdot \Delta t} = \frac{590868 \text{ kWh/a}}{0,0189 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1012 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,915 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 6^\circ\text{C}} = 1315 \text{ h/a} \quad (17)$$

Pumpun P3 vuotuinen käyntiaika vapaajähdytyksessä, lämpötilaerolla 5 °C

$$t_{P3} = \frac{E_L}{q_{v,P3} \cdot \rho_{ll} \cdot c_{p,ll} \cdot \Delta t} = \frac{(1441440 - 590868) \text{ kWh/a}}{0,0189 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1012 \text{ kg/m}^3 \cdot 3,915 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} \cdot 5^\circ\text{C}} = 2272 \text{ h/a} \quad (18)$$

Pumpun P3 vuotuinen käyntiaika yhteensä on

$$1315 \text{ h/a} + 2272 \text{ h/a} = 3587 \text{ h/a} \quad (19)$$

Lauhdepiirin pumpun P3 kuluttama sähköteho saadaan pumpun vuotuisesta käyntiajasta ja nimellistehosta

$$E_{P3} = P_{P3} \cdot t_{P3} = 5,5 \text{ kW} \cdot 3578 \text{ h/a} = 19729 \text{ kWh/a} = 20 \text{ MWh/a} \quad (20)$$

Taulukossa 3 esitetään yhteenveto vedenjäähdytyskoneen ja pumppujen energiankulutuksista, käyttöajoista sekä kustannuksista vuoden aikana. Sähkön hintana laskelmissa on käytetty 48,90 €/MWh.

**TAULUKKO 3. Jäähdytys vedenjäähdytyskoneella ja vapaajäähdytyksellä.**

	Käyntiaika h/a	Kulutus MWh/a	Kustannus €/a
Vedenjäähdytyskoneen kompressori	1279	107	5232
Jäähdytysverkoston kiertopumppu P1	3284	13	636
Jäähdytysvaraajan kiertopumppu P2	1346	5	245
Lauhdutuspiirin kiertopumppu P3	3578	20	978
Yhteensä			7091

**10 TULOKSET**

Vedenjäähdytyskone ilman vapaajäähdytystä kuluttaa sähköenergiaa noin 306 MWh/a ja vapaajäähdytyskoneella varustettu järjestelmä 145 MWh/a. Lisäämällä vapaajäähdytys nykyiseen järjestelmään saadaan energiankulutus puolitettua. Vapaajäähdytyslaitteella ja vedenjäähdytyskoneella tuotettu kylmäteho kuluttaa noin 52 % vähemmän energiaa, kuin nykyinen järjestelmä.

Vapaajäähdytyslaitteen kustannusarvio on kaikkine töineen 19 500 € (alv 0 %).

Kustannusarvio kattaa kaikki rakennus-, putki-, automaatio- ja sähkötyöt järjestelmän saattamiseksi täyteen toimintakuntoon.

Vedenjäähdytysjärjestelmän vuotuiset käyttökustannukset ilman vapaajäähdytystä ovat noin 15 000 € ja vapaajäähdytystä käytettäessä 7 100 €. Näin ollen säästöjä voitaisiin saada vuodessa jopa 7 900 €, mikä on yli puolet nykyisistä kustannuksista.

Vapaajäähdytysjärjestelmästä saatavilla säästöillä järjestelmän takaisinmaksuajaksi tulisi noin 2,5 vuotta. Takaisinmaksuaika perustuu järjestelmän investointikustannusten ja nettosäästöjen suhteeseen

$$n = \frac{I}{S} = \frac{19500 \text{ €}}{7900 \text{ €/a}} = 2,47 \text{ a} = 2,5 \text{ a} \quad (21)$$



## 11 POHDINTA

Työn tavoitteena oli selvittää Sädesairaallalle suunnitellun vapaajäähdytysjärjestelmän hankinta- ja käyttökustannukset sekä sen lisäämisen tuomat mahdolliset säästöt. Mittausten ja laskelmien perusteella voidaan todeta, että vapaajäähdytysjärjestelmä tuo huomattavia säästöjä energiankulutukseen. Uuden järjestelmän käyttökustannukset ovat jopa yli puolet pienemmät, kuin nykyisen järjestelmän. Kun selvitettiin myös hankintakustannus, saatiin selville uuden järjestelmän takaisinmaksu aika, joka on 2,5 vuotta.

Työssä käytettiin vertailukohtana nykyistä tilannetta, jossa rakennuksen jäähdytys toteutetaan ainoastaan vedenjäähdytykoneella. Nykyinen järjestelmä kuluttaa huomattavan paljon energiaa ja uuden vapaajäähdytysjärjestelmän avulla sairaala voi puolittaa vuosittaiset käyttökustannukset. Voidaan siis todeta, että investoinnilla saadaan aikaan niin paljon säästöjä, että vapaajäähdytysjärjestelmän hankinta on kannattavaa.

Tutkimuksen lyhyen toteutusajan ja näin ollen mittausten lyhyen keston vuoksi, tutkimuksen tuloksia ei voida pitää täysin tarkkoina, sillä laskelmissa käytettyjä arvoja on jouduttu arvioimaan ja laskemaan häviöittä. Tutkimuksen perusteella olikin tarkoitus saada selville niin sanottuja suuntaa-antavia tuloksia, joiden perusteella saadaan käsitys vapaajäähdytysjärjestelmän toiminnasta ja energiankulutuksesta. Vapaajäähdytysjärjestelmän todelliset säästöt saadaan selville vasta, kun järjestelmä on täydessä toiminnassa ja pystytään mittaamaan sen kulutusta vähintään vuoden ajalta.

Aivan työn alkuvaiheessa oli tarkoitus vertailla vapaajäähdytyksellä ja lauhdelämmöntalteenotolla saatavia säästöjä. Lauhdelämmön osuutta tutkimuksessa kuitenkin supistettiin teoriatasolle, koska lauhdelämmöntalteenoton tutkiminen on erityisen hankalaa ja olisi vaatinut huomattavasti pidemmän tutkimisajan. Alussa todettiin myös, että todennäköisimmin paremmat säästöt tässä kohteessa saadaan aikaan vapaajäähdytyksen avulla. Niinpä lauhdelämmön hyötykäyttöä tutkittiin teoriassa ja selvitettiin kuinka uusi Econet® energiajärjestelmä pystyy hyödyntämään tätä hukkalämpöä. Econet® on käyttökelpoinen ja toimiva ratkaisu, jonka voi lisätä myös vanhoihin ilmastointikoneisiin.

Työn tulosten perusteella toimeksiantaja sai perusteellisen selvityksen vapaajähdytysjärjestelmän hankinta- ja käyttökustannuksista, takaisinmaksuajasta sekä energiansäästöstä. Voidaankin todeta, että kohtalaisen pienellä investoinnilla saadaan hyvin nopeasti aikaan huomattavia säästöjä. Tutkimuksen pohjalta toimeksiantajan on hyvä lähteä viemään projektia eteenpäin aina valmiiseen vapaajähdytysjärjestelmään saakka.

## LÄHTEET

1. Jussila, Jari. 2010. Sähköpostikeskustelu 13.4. – 14.4.2010. Keski-Suomen sairaanhoitopiiri.
2. Seppänen, Olli. Ilmastoinnin suunnittelu. Forssa. Suomen LVI-liitto. 2004
3. TTKK. Välilliset kylmälaitokset, suunnittelu ja rakentaminen. Tampere. TTKK. 2001
4. Seppänen, Olli & Seppänen, Matti. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Espoo. SIY Sisäilmätieto Oy. 2004
5. Aittomäki, Antero. Kylmätekniikka. Helsinki. Suomen Kylmäyhdistys r.y. 2008.
6. Hakala, Pertti & Kaappola, Esko. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki. Opetushallitus. 2005
7. Onninen Oy. WWW-sivut. <http://www.vapaaajaahdytys.fi>. Luettu 14.1.2010.
8. Fläkt Woods Oy. Yrityksen WWW-sivut. <http://www.flaktwoods.fi>. Luettu 20.1.2010.
9. Econet® käsikirja. Fläkt Woods Oy.
10. LVI-alan yritys. Urakkatarjous. 2010.
11. Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122. WWW-dokumentti. <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=9298&lan=fi>. Helsinki. 2003. Luettu 12.4.2010.

## **LIITTEET**

- LIITE 1 Suunnitelma
- LIITE 2 Ulkolämpötilojen pysyvyystiedot
- LIITE 3 Sädesairaalan vedenjäähdytyskone VJK1
- LIITE 4 Sädesairaalan vedenjäähdytyskoneen VJK1 jäähdytysvesivaraaja ja jäähdytysvesiverkoston kiertopumppu P3
- LIITE 5 Sädesairaalan vedenjäähdytyskoneen lauhdepiirin kiertopumppu P3



Ulkolämpötilojen pysyvyytiedot; Jyväskylä testivuosi 1979

Prosenttiosuus ilmoittaa, kuinka suuri osuus vuodesta on kyseistä ulkoilman lämpötilaa kylmempi.

$t_u$ °C	Aika vuodesta %	Aika vuodesta h	Aika yht. vuodesta h	$t_u$ °C	Aika vuodesta %	Aika vuodesta h	Aika yht. vuodesta h
-35	0	0	0	-3	26,29	296	2303
-34	0,057	5	5	-2	29,1	246	2549
-33	0,08	2	7	-1	32,93	336	2885
-32	0,091	1	8	0	38,18	460	3345
-31	0,171	7	15	1	45,47	639	3983
-30	0,263	8	23	2	50,21	415	4398
-29	0,377	10	33	3	54,03	335	4733
-28	0,548	15	48	4	56,95	256	4989
-27	0,753	18	66	5	59,39	214	5203
-26	0,902	13	79	6	62,07	235	5437
-25	1,21	27	106	7	63,95	165	5602
-24	1,553	30	136	8	65,96	176	5778
-23	1,975	37	173	9	68,37	211	5989
-22	2,432	40	213	10	70,88	220	6209
-21	2,911	42	255	11	73,74	251	6460
-20	3,368	40	295	12	76,39	232	6692
-19	3,984	54	349	13	79,26	251	6943
-18	4,749	67	416	14	82,74	305	7248
-17	5,731	86	502	15	85,79	267	7515
-16	6,963	108	610	16	88,69	254	7769
-15	7,74	68	678	17	91,07	208	7978
-14	8,402	58	736	18	93,24	190	8168
-13	9,064	58	794	19	94,9	145	8313
-12	9,68	54	848	20	96,35	127	8440
-11	10,45	67	915	21	97,52	102	8543
-10	11,95	131	1047	22	98,39	76	8619
-9	13,32	120	1167	23	99	53	8672
-8	14,51	104	1271	24	99,35	31	8703
-7	15,96	127	1398	25	99,69	30	8733
-6	17,71	153	1551	26	99,86	15	8748
-5	19,9	192	1743	27	99,95	8	8756
-4	22,91	264	2007	28	100	4	8760

Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto lämpöhäviöiden tasauslaskennassa. 2003. Ympäristöministeriön moniste 122.



Sädesairaalan vedenjäähdytyskone VJK1



Sädesairaalan vedenjäähdytyskoneen VJK1 jäähdytysvesivaraaja ja jäähdytysvesiverkoston kiertopumppu P1.





Sädesairaalan Vedenjäähdytyskoneen lauhdepiirin kiertopumppu P3.