

Anssi Malinen

Syvääpakastinhuoneen olosuhteiden parantaminen ja vaikutukset energian säästöön

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinööriytyö

5.9.2017

Tekijä Otsikko	Anssi Malinen Syväjäähdytyslaitteiden olosuhteiden parantaminen ja vaikutukset energian säästöön
Sivumäärä Aika	45 sivua + 7 liitettä 5.9.2017
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Jukka Yrjölä projektipäällikkö Jussi Tuomola
<p>Tämän insinööritöiden tavoitteena oli selvittää syväjäähdytyslaitteiden ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmän toiminta, tehdä järjestelmiin parannuksia ja tarkastella uutta tilannetta. Alkutilanteessa pakastinhuoneen jäähdytys oli lämpökuorman nähden riittämätön, ja se toimi epäedullisissa olosuhteissa. Huoneen ilmanvaihto oli epätasapainossa ja säätämättä.</p> <p>Työssä tarkasteltiin jäähdytysprosessia alussa ja uudelleen muutosten jälkeen. Aluksi jäähdytyslaitteiston kunto ja toiminta selvitettiin. Tämän jälkeen tehtiin suunnitelma jäähdytyslaitteiston muutostyöstä. Laitteistoon tehtiin suunnitelman mukaiset muutokset, ja niiden onnistuneisuutta arvioitiin mittaustulosten pohjalta.</p> <p>Ilmanvaihto korjattiin, mitoitettiin ja säädettiin vastaamaan laskennallista tulosta. Mitoitusperusteena käytettiin tilassa olevan yhden syväjäähdytyslaitteen vaikutusta tilan CO₂-pitoisuuteen. Tavoitearvoksi valittiin hätäjäähdytyksen tapahtuessa CO₂-pitoisuus 5 000 ppm (HTP 8 h).</p> <p>Syväjäähdytyslaitteiden olosuhteiden muutoksen vaikutusta syväjäähdytyslaitteiden energiankulutukseen verrattiin lähtötilanteessa ja uudelleen muuttuneessa tilanteessa. Kahteen syväjäähdytyslaitteeseen asennettiin pistorasialitännäiset energiamittarit. Kulutusta seurattiin alussa neljä viikkoa, minkä jälkeen kulutuslukemat kirjattiin muistiin. Mittaus uusittiin jäähdytyslaitteiden muutosten jälkeen.</p> <p>Työssä tarkasteltiin myös lämmönsiirtoa taserajojen yli ja lämpöenergian siirtämiseen liittyviä tekniikoita ja prosesseja. Lopuksi vertailtiin ilman jäähdytysprosesseja ennen ja jälkeen muutosten sekä kaikkien muutosten vaikutusta energian säästöön. Jäähdytysteho kasvoi 71,9 %, mutta samaan aikaan kompressorin verkosta ottama teho laski 2,7 %. Syväjäähdytyslaitteiden ympäristön lämpötilan muutos laski energian kulutusta keskimäärin 11,9 %. Lopputulema oli, että projekti onnistui yli odotusten, mutta insinööritöistä tuli suunniteltua laajempi.</p>	
Avainsanat	jäähdytys, ilmanvaihto, syväjäähdytys

Author Title	Anssi Malinen Energy savings by improving the cooling and ventilation in the deep freezer room.
Number of Pages Date	45 pages + 7 appendices 5 September 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructors	Jukka Yrjölä, Principal Lecturer Jussi Tuomola, Project Manager
<p>The purpose and goal of this final year project was to improve the ventilation and cooling of a deep freezer room. The starting point was that the ventilation was not working as planned and cooling was ineffective and uneconomic.</p> <p>The cooling process was under a thorough examination before and after the changes that were made to the system. The old evaporator was replaced by a more effective one and the ventilation was dimensioned and adjusted. The dimensioning of the ventilation was based on CO₂ emergency cooling and the maximum CO₂ content 5 000 ppm (HTP 8 h). These changes made it possible to lower the temperature of the freezer room by 7 degrees Celsius.</p> <p>The change of the temperature in the deep freezer room also affected the energy consumption of the deep freezers. This was shown by measurements taken from two deep freezers before and after the changes.</p> <p>A comparison between the air cooling process before and after the change of the evaporator and the relative savings was made at the end of this thesis. The cooling capacity increased by 71.9 % and at the same time the power consumption of the compressor decreased by 2.7 %. The energy consumption of the deep freezers decreased by 11.9 %.</p> <p>In conclusion, the project was successful and its goal was fulfilled. The thesis offers a diverse overview on the topic.</p>	
Keywords	cooling, ventilation, deep freezer

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Insinööriyön tilaaja ja kohde	1
1.2	Insinööriyön tarve	2
1.3	Tavoitteet	2
2	Teoria	3
2.1	Lämmön siirtyminen	3
2.2	Lämmön siirtyminen putkistossa ja lämmönsiirtimissä	4
2.3	Taseraja, teoria	8
2.4	Kylmäkoneisto	8
2.5	Log p, h -tilapiirros	10
2.6	Kylmäkoneikon hyötysuhde	11
2.7	Ilman jäähdytys	12
2.8	Taserajojen määrittely	14
2.8.1	Ensimmäinen taseraja, syväjäähdytys	15
2.8.2	Toinen taseraja, syväjäähdytys huone BK205	17
2.8.3	Kolmas taseraja, kiinteistön ulkovaippa	17
3	Kohteen tiedot ja lähtötilanne	17
3.1	Syväjäähdytys huone BK205	17
3.2	Syväjäähdytys huoneen jäähdytyslaitteisto	18
3.2.1	Höyrytimet	18
3.2.2	Jäähdytyskompressorit	20
3.2.3	Lauhdutus ja lämmönsiirto	21
3.2.4	Jäähdytyskoneikko	22
3.2.5	Ohjaukset, varolaitteet, hälytykset	22
3.3	Tilan ilmanvaihto	23
3.4	Syväjäähdytys, tilan lämpökuorma	23
3.5	Hätäjäähdytys	23
4	Ilmanvaihdon parannusratkaisut	25
4.1	Tuloilmakoje	25

4.2	Tuloilma tilaan BK205	25
4.3	Tuloilman säätö	26
4.4	Poistoilma	26
5	Jäähdytysprosessi, lähtötilanne	27
5.1	Kylmäkoneikon mittaukset	27
5.1.1	Paine- ja lämpötilamittaukset	27
5.1.2	Kompressorin virtamittaus ja teho	29
5.2	Höyrystimen mittaukset	30
5.3	Tuloilman mittaus	31
5.4	Jäähdytyslaitteiston kylmäprosessi	31
6	Kylmäsuunnitelma	33
6.1	Uusi höyrystin	33
6.2	Putkisto, komponentit	34
6.2.1	Putkisto	34
6.2.2	Käynnistyssäädin	34
7	Asennukset	35
8	Jäähdytysprosessi, lopputilanne	35
8.1	Koneikon mittaukset	35
8.1.1	Koneikon koekäyttö, säätö ja siihen liittyvät mittaukset	35
8.1.2	Paine- ja lämpötilamittaukset	36
8.1.3	Kompressorin virtamittaus ja teho	37
8.2	Höyrystimen mittaukset	37
8.3	Jäähdytyslaitteiston kylmäprosessi	38
9	Jälkitarkastelu, energiansäästö	39
9.1	Ilmanvaihto	39
9.2	Kylmäprosessi ja kylmäkoneikko	39
9.3	Höyrystimen jäähdytysteho	40
9.4	Syväjäähdytyslaitteet	41
9.5	Pohdintaa	42
10	Yhteenveto	43
	Lähteet	45

Liitteet

Liite 1. Haartmaninkatu 3, BK205 syväjäähäpakastimet

Liite 2. Haartmaninkatu 3, tarvittavan ilmanvaihdon laskenta

Liite 3. Haartmaninkatu 3, BK205 ilmanvaihdon mittaus ja säätö

Liite 4. Haartmaninkatu 3, mittauspöytäkirja 12.1.2017

Liite 5. Haartmaninkatu 3, JK 1.1 Lauhduttimen toisiovirtaama

Liite 6. Haartmaninkatu 3, mittauspöytäkirja 5.4.2017

Liite 7. Haartmaninkatu 3, tehon laskenta, energiamittaukset ja säästövaikutus

Lyhenteet

CO ₂	hiilidioksidi (R744)
COP	coefficient of performance. Kylmäkerroin tai lämpökerroin
HTP	haitalliseksi tunnettu pitoisuus
IE2	IE2 High efficiency. Korkea hyötysuhdeluokka
ppm	parts per million. Miljoonasosaa
R404A	tseotrooppinen kylmäaineseos (trifluorietaani 52 %, pentafluorietaani 44 %, tetrafluorietaani 4 %)
R407C	tseotrooppinen kylmäaineseos (tetrafluorietaani 52 %, pentafluorietaani 25 %, difluorimetaani 23 %)
RakMK	Suomen rakentamismääräyskokoelma

1 Johdanto

1.1 Insinööriyön tilaaja ja kohde

Tämän insinööriyön tilasi Helsingin yliopiston Tila- ja kiinteistökeskus TILA [1]. Tila- ja kiinteistökeskus on Helsingin yliopiston erillislaitos, joka vastaa yliopiston käytössä tai omistuksessa olevien kiinteistöjen omistamiseen, kehittämiseen ja hallintaan liittyvistä tehtävistä sekä yliopiston investointisuunnitelman ja rakennushankkeiden toteuttamisesta. TILA huolehtii yliopiston käytössä olevien toimitilojen ja kiinteistöjen sekä niihin liittyvien kalusteiden ja varusteiden hoidosta, huollosta, kunnossapidosta sekä tilapalveluista ja muista toimitiloihin liittyvistä palveluista ja hankinnoista.

Insinööriyön kohteena on Helsingin yliopiston käytössä olevan tutkimuskiinteistön Haartmaninkatu 3:n syväjäähdytyskammeri BK205. Huone on esitetty kuvassa 1. Kulkureitit vasemmalla puolella on arkkumallisia pakastimia ja oikealla puolella pystymallisia pakastimia. Työ keskittyy huoneen ilmanvaihdon ja jäähdytyksen tarkasteluun ja muutostöihin sekä muutosten vaikutukseen jäähdytysjärjestelmän ja syväjäähdytyskammerien energiankulutukseen.



Kuva 1. Haartmaninkatu 3, syväjäähdytyskammeri BK205.

1.2 Insinööriyön tarve

Syväjääpakastinhuoneeseen BK205 on sijoitettu niin paljon pakastimia kuin sinne käytännössä mahtuu. Tästä syystä pakastinhuoneen jäähdytysteho ei enää vastaa tilan lämpökuormaa. Jäähdytysjärjestelmä on 12 vuotta vanha ja varsinkin tilan neljä kattojäähdytyskasettia lähestyvät teknisen käyttöikänsä loppua. Kasetteihin ei myöskään ole enää kaikkia varaosia saatavilla. Jäähdytyslaitteistot toimivat epäedullisissa olosuhteissa, ja pakastinhuoneen lämpötila on liian korkea. Tilan ilmanvaihdossa on huomattavia puutteita, ja ilmapirrat ovat säätämättä. Tuloilman päätelaitteet on poistettu, ilmeisesti tarkoituksena parantaa tilan jäähdytystä. Näistä syistä johtuen on tarpeellista tehdä järjestelmiin muutoksia, jotta ilmanvaihto ja jäähdytyslaitteisto saadaan luotettavaan kuntoon ja toisaalta energiankulutusta voidaan pienentää.

1.3 Tavoitteet

Ensisijaisena tavoitteena insinööriyöllä on saattaa tilan BK205 jäähdytys vastaamaan tilan lämpökuormaa. Insinööriyössä tullaan tarkastelemaan jäähdytyslaitteen kylmäprosessia ennen ja jälkeen muutosten. Syväjäähpakastinhuonetta jäähdyttää neljä erillistä jäähdytyspiiriä, joiden kompressorit ovat rakennettu samaan koneikkoon. Pakastinhuoneessa on neljä kattojäähdytyskasettia, joita ohjataan omilla seinätermoasteilla. Tässä työssä lasketaan ja mitoitetaan yhden jäähdytyspiirin osalta uusi höyrystin. Samalla kylmäprosessi muuttuu olennaisesti, joten myös komponentti- ja putkistomitoitus sekä lauhduminen tarkistetaan ja niihin tehdään tarvittavat muutokset. Olennaisena osuutena työssä tarkastellaan höyrystymislämpötilan muutosta ja sen vaikutusta kylmäprosessin hyötysuhteeseen sekä tuntuvaan jäähdytystehoon. Mitoituksen pohjalta tehdään tarkasteltavaan laitteistoon tarvittavat muutokset. Muuttunut tilanne ja olosuhteet dokumentoidaan ja niitä verrataan lähtötilanteeseen. Jäähdytyskoneen ohjaus- ja sulatustapa muutetaan tarvittaessa. Suunnitteludokumentit päivitetään vastaamaan uutta toteutusta. Insinööriyön tulosten pohjalta yhden jäähdytyskoneikon muutokset tullaan monistamaan muihin kolmeen jäähdytyskoneikkoon. Tarvittaessa mitoitusta, laitevalintoja ja suunnitelmaa muutetaan.

Toisena tavoitteena on tilan ilmanvaihdon tarkistaminen ja muutostyö vastaamaan tarvetta. Mitoitusperusteena on tilassa olevan yhden syväjäääarkun CO₂-hätäjäähdytyksen vaikutus tilan CO₂-pitoisuuteen. Tavoitearvoksi on valittu hätäjäähdytyksen tapahtuessa

maksimipitoisuus 5 000 ppm (HTP 8 h). Laskennallista tulosta verrataan Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osan D2 minimi-ilmanvaihtoon [2]. Tilan viiden tuloilmapäätelaitteen ilmavirrat säädetään suhteellisella säätötavalla. Poistoilmavirtaus toteutetaan oviin lisättävien siirtoilmasäleikköjen kautta tekniikkaseinän takana oleville poistoilmaelimille, joiden ilmavirrat säädetään samoin kuin tuloilmapäätelaitteiden.

Projekti on tavanomainen työelämäprojekti, mutta sen haastavuutta ja innovatiivisuutta lisätään syväjäähäarkkujen energiatalouden tarkastelulla. Lähtötilanteessa mitataan tarkastelualueella olevan kahden syväjäähäarkun energiakulutus aikavälillä, jonka edustavuus on riittävä. Uudessa tilanteessa mittaus toistetaan ja tuloksia verrataan keskenään. Tarkoituksena on selvittää, kuinka paljon ympäristön lämpötila vaikuttaa syväjäähäpakastimien energiankulutukseen.

Työssä kiinnitetään huomiota energiatalouteen laitevalintojen ja mitoituksen kautta. Päämääräisesti tavoitteena on kuitenkin toteuttaa luotettava ja toimintavarma jäähdytyslaitteisto tilaan, jonka olosuhteet ovat erittäin haastavat.

2 Teoria

2.1 Lämmön siirtyminen

Tämä insinööriyö käsittelee lämmönsiirtymistä ja -siirtoa eri tekniikoita ja väliaineita hyväksi käyttäen. Tämän takia on tarpeellista esittää lämmönsiirtoon liittyvät tärkeimmät kaavat ja lainalaisuudet.

Kaikki energia voidaan muuttaa lämmöksi ja lämpö voi siirtyä johtumalla, konvektiolla ja säteilemällä. Näistä konvektio voi olla vapaata tai pakotettua. Useimmiten lämpö siirtyy näiden yhdistelmällä, mutta eri lämmönsiirtymistapojen suhteessa on huomattavia eroja. Aineen lämpötilan muuttuessa sitoutuva tai vapautuva lämpöenergiämäärä voidaan laskea kaavalla

$$Q = m c_p \Delta T \quad (1)$$

Q on lämpöenergia [J]

m on massa [kg]

c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [$J/kg K$]

ΔT on lämpötilaero [K]

Jotta lämmönsiirtymisen tehokkuutta voidaan tarkastella, täytyy määrittää lämmön siirto aikayksikköä kohden

$$\phi = q_m c_p \Delta T \quad (2)$$

ϕ on lämpöteho [J/s]

q_m on massavirta [kg/s]

c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [$J/kg K$]

ΔT on lämpötilaero [K]

Lämpötehon kaava voidaan myös kirjoittaa muotoon

$$\Phi = q_v \rho c_p \Delta T \quad (3)$$

q_v on tilavuusvirta [m^3/s]

ρ on lämmönsiirtoaineen tiheys [kg/m^3]

Kaavassa esiintyvät tilavuusvirta, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti voidaan korvata termillä \dot{C} , lämpökapasiteettivirta, jolloin lämpötehon kaava saa yksinkertaisemman muodon

$$\Phi = \dot{C} \Delta T \quad (4)$$

Lämpötehon ja samalla jäähdystehon yksikkönä käytetään yleisemmin yksikköä watti [W] – myös sähkötehon yksikkö on watti.

2.2 Lämmön siirtyminen putkistossa ja lämmönsiirtimissä

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämpö voi siirtyä spontaanisti vain korkeammasta matalampaan lämpötilaan. Näin tapahtuu, kun esimerkiksi lämmitykseen käytettävä patteri luovuttaa lämpösisältöään huoneeseen. Vastaavasti jäähdytyspatteri ot-

taa vastaan lämpöä jäädytettävästä tilasta. Lämmön siirtyminen on suoraan verrannollista lämpötilaeroon. Lämmön siirto on siis sitä tehokkaampaa, mitä suurempi lämpötilaero on käytettävissä.

Lämmitys- ja jäädytystekniikassa lämpöä jaetaan käyttökohteisiin putkistoilla ja sitä siirretään aineesta toiseen lämmönsiirtimiä hyväksi käyttäen. Lämmönsiirtoputkistoissa lämpöä siirtyy seinämien läpi ympäristöön. Tämä lämmönsiirtyminen ei yleensä ole toivottavaa, mutta lämmönsiirtimien kohdalla pyritään mahdollisimman tehokkaaseen lämmön siirtymiseen.

Lämmönsiirtimessä tapahtuu stationääristä lämmön johtumista, jolle voidaan kirjoittaa Fourierin lain yhtälö siirtyvälle lämpömäärälle

$$Q = -\lambda t A \frac{\delta T}{\delta X} \quad (5)$$

Q on lämpömäärä [J]

λ on lämmönjohtavuus [$W / K m$]

t on aika [s]

A on pinta-ala [m^2]

$\frac{\delta T}{\delta X}$ on lämpötilagradientti [K/m]

Lämpömäärä on siis suoraan verrannollinen lämmönjohtavuuteen, aikaan, lämmönsiirtopinta-alaan ja lämpötilagradienttiin. Lämpövirta on aikayksikössä siirtynyt lämpömäärä, ja sille yhtälö kirjoitetaan seuraavasti

$$\Phi = \frac{Q}{t} = -\lambda A \frac{\delta T}{\delta X} \quad (6)$$

Lämpövirran tiheys q [W/m^2] lasketaan pinta-alayksikköä kohden kaavasta

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (7)$$

Lämmönsiirtimessä, jossa lämmönsiirtoaineet virtaavat lämmönsiirtimen eri puolilla, on kyse pakotetusta konvektiosta. Tämän kuvaamiseksi on yhdistettävä aineensiirtoa ja lämmönjohtumista kuvaavat peruslait.

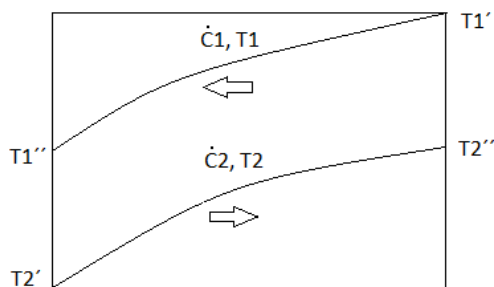
Olenaisesti lämmön siirtymiseen vaikuttaa rajakerros, jonka ulkopuolella virtauksen katsotaan saavuttaneen nopeuden, joka vallitsee äärettömän kaukana virtauspinnasta. Virtaus voi olla nopeuden ja virtauspinnan karheudesta riippuen joko laminaarista tai turbulentista. Raja näiden virtaustyyppien välillä ei ole tarkka, vaan siirtyminen tapahtuu asteittain alueelta toiselle. Laminaarisessa virtauksessa rajakerroksessa virtaus on yhdensuuntaista. Sen sijaan turbulentsissa virtauksessa muodostuu pyörteitä, jolloin virtaus voi olla välillä myös kohtisuorassa virtauspintaa vastaan. Tämän johdosta lämmön siirtyminen virtauspinnan yli turbulentsissa virtauksessa on huomattavasti tehokkaampaa kuin laminaarisessa virtauksessa.

Rajakerroksen lisäksi lämmönsiirtoon vaikuttaa lämmönsiirtokerroin α [W/m^2K], joka määrittellään lämmönsiirtoaineen ja virtauspinnan välille seuraavasti:

$$\alpha = \frac{q}{\theta} \quad (8)$$

jossa θ on virtauspinnan ja kaukana siitä olevan lämmönsiirtoaineen lämpötilaero.

Lämmönsiirtimessä lämpö siirtyy ainevirrasta toiseen. Kuvassa 2 on esitetty vastavirtalämmönsiirtimen lämpökapasiteettivirrat ja lämpötilaprofiilit periaatepiirroksena.



Kuva 2. Lämpötilat ja lämpökapasiteettivirrat vastavirtalämmönsiirtimessä.

Täydellisesti ympäristöstään eristetyn lämmönsiirtimen lämmön siirtymistä voidaan kuvata taseyhtälöllä

$$\Phi = \dot{c}_1 (T_1' - T_1'') = \dot{c}_2 (T_2' - T_2'') \quad (9)$$

T_1' on lämmönsiirtimelle tulevan lämmittävän ainevirran lämpötila [K]

T_1'' on lämmönsiirtimeltä lähtevän lämmittävän ainevirran lämpötila [K]

T_2' on lämmönsiirtimelle tulevan lämpenevän ainevirran lämpötila [K]

T_2'' on lämmönsiirtimeltä lähtevän lämpenevän ainevirran lämpötila [K]

\dot{C}_1 on lämmittävä lämpökapasiteettivirta [W/K]

\dot{C}_2 on lämpenevä lämpökapasiteettivirta [W/K]

Logaritminen lämpötilaero lämmönsiirtimessä voidaan laskea ainevirtojen lämpötilojen avulla

$$\theta_{ln} = \frac{(T_1' - T_2'') - (T_1'' - T_2')}{\ln \frac{(T_1' - T_2'')}{(T_1'' - T_2')}} \quad (10)$$

Nyt olemme määritelleet lämmön siirtymisen putkessa ja edelleen lämmön siirtymisen lämmönsiirtimessä. Lämmönsiirrin muodostaa taserajan, jonka sisällä lämpö siirtyy ensiöpuolelta toisiopuolelle. Sen kykyä lämmön siirtoon voidaan kuvata konduktanssilla

$$G = U A \quad (11)$$

G on konduktanssi [W/K]

U on lämmönsiirtimen lämmönläpäisykerroin [W / m² K]

A on lämmönsiirtopinta-ala [m²]

Lämmönsiirtimen teho voidaan laskea myös konduktanssin ja logaritmisen lämpötilaeron avulla

$$\Phi = G \theta_{ln} \quad (12)$$

Lämmönsiirrin on sitä tehokkaampi, mitä suurempi on lämmönsiirtopinta-ala, mitä parempi on lämmönläpäisykerroin ja mitä suurempi on ensiö- ja toisiovirran lämpötilaero. Näitä ominaisuuksia ei voi kuitenkaan kasvattaa loputtomiin, koska vastaan tulevat tekniset ja taloudelliset rajoitukset sekä virtauksen aiheuttamat painehäviöt. Lämmönsiirrin on siis aina kompromissi.

2.3 Taseraja, teoria

Jotta jäähdytysprosessia ja ylipäätään lämmönsiirtoa voidaan tarkastella, täytyy määrittää tarkastelun taseraja. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan systeemin sisäenergian muutos on systeemiin tuodun lämmön ja siihen tehdyn työn summa

$$\Delta U = Q + W \quad (13)$$

ΔU on sisäenergian muutos [J]

Q on systeemiin tuotu lämpö [J]

W on systeemiin tehty työ [J]

Sisäenergian muutos voidaan myös kirjoittaa muotoon

$$\Delta U = m c_V \Delta T \quad (14)$$

m on massa [kg]

c_V on ominaislämpökapasiteetti vakiotilavuudessa [J/kg K]

ΔT on lämpötilaero [K]

2.4 Kylmäkoneisto

Aina ei kannata siirtää lämpöä suoraan ylemmästä lämpötilasta alempaan, koska käytettävä lämpötilaero on niin pieni, että lämpökapasiteettivirta muodostuu liian suureksi. Lämpökapasiteettivirta voidaan määrittellä

$$\dot{C} = \rho q_v c_p \quad (15)$$

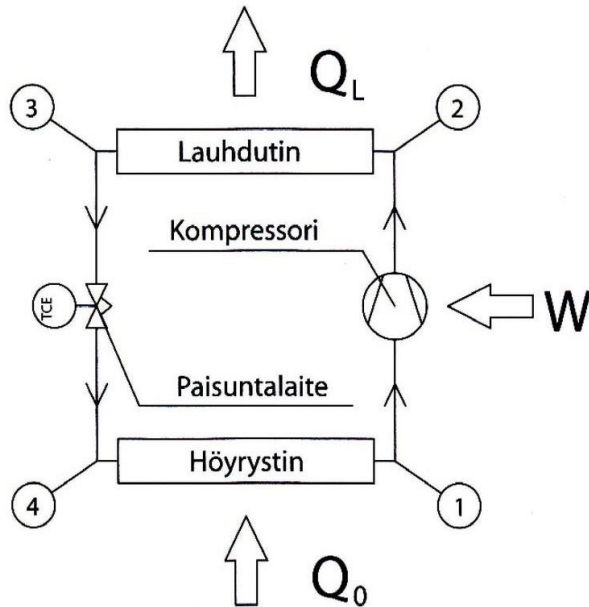
\dot{C} on lämpökapasiteettivirta [W/K]

ρ on siirtoaineen tiheys [kg/m³]

q_v on tilavuusvirta [m³/s]

c_p on ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa [J/kg K]

Toisinaan tilanne voi olla myös se, että lämpöä täytyy siirtää matalammasta korkeampaan lämpötilaan. Tällöin voidaan käyttää kylmäprosessiin perustuvaa kylmäkoneikkoa, jonka periaatteellinen toiminta on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Yksinkertainen kylmäkoneisto [4, s. 11].

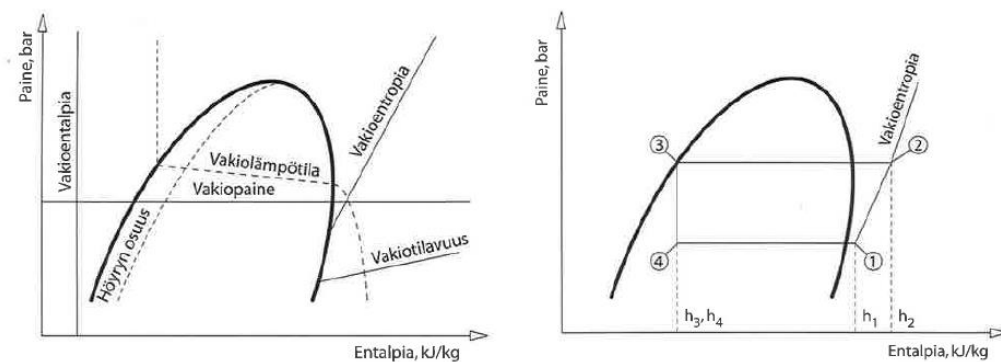
Prosessi perustuu suljetussa kiertopiirissä kompressorin avulla kierrätettävän kylmäaineen höyrystämiseen ja lauhduttamiseen. Käytettävä kylmäaine valitaan siten, että se voidaan höyrystää jäähdytettävässä kohteessa lämmönsiirtimenä käytettävässä höyrystimessä. Kylmäaine lauhdutetaan nesteeksi lauhduttimessa, joka siirtää lämpöä ympäristöönsä. Luonnollisesti lauhduttimen ympäristön lämpötila täytyy olla tasolla, joka mahdollistaa kylmäaineen lauhtumisen.

Kuvassa 3 kompressori imee höyrystynyttä kylmäainehöyryä ja puristaa sen korkeampaan paine- ja lämpötilatasoon. Lauhduttimessa kylmäaine lauhtuu. Tämän jälkeen kylmäaine kulkeutuu paisuntalaitteelle, jossa nestemäisen kylmäaineen paine laskee. Neste muuttuu neste-höyryseokseksi, ja sen lämpötila laskee höyrystymislämpötilaan.

Kylmäprosessi perustuu siis käytettävän kylmäaineen olomuodon muutoksessa vapautuvan tai sitoutuvan latentin lämmön hyväksikäyttöön.

2.5 Log p, h -tilapiirros

Kylmäprosessi esitetään usein log p, h -tilapiirroksessa, joka on esitetty kuvassa 4. Kuvan vasemmanpuoleisessa piirroksessa on esitetty siinä esiintyvät suureet ja niiden käyrät logaritmisena, absoluuttisen paineasteikon ja lineaarisen entalpia-asteikon funktiona. Oikean puoleiseen piirrokseen on piirretty teoreettinen kylmäprosessi, jossa kompressorin puristus tapahtuu pisteestä 1 pisteeseen 2. Kylmäkoneikon lauhdutinta kuvaa prosessin muutos pisteestä 2 pisteeseen 3, ja paisuntaelintä paineen lasku pisteestä 3 pisteeseen 4. Kiertoprosessi palaa alkupisteeseen 1 pisteestä 4 – tämä muutos kuvaa höyrystintä.



Kuva 4. Tsetrooppisen kylmäaineen log p, h -piirros ja teoreettinen kylmäprosessi [4, s. 12].

Vasemmanpuoleisessa tilapiirroksessa on esitetty kylmäaineen R407 C vakioilämpötila-viiva eli isotermi. Kuten kuvasta voidaan todeta, on tämä katkoviiva kylmäaineen eri olomuotoja erottavan käyrän vasemmalla puolella, alijäähtyneen kylmäainenesteen alueella, pystysuora. Tämä kuvaa vakioilämpötilaa vakioentalpiassa riippumatta paineesta. Käyrän sisäpuolella, jossa kylmäaine on sekä neste- että höyryfaasissa, on isotermi laskeva. Tämä johtuu kylmäaineen R407 C liukumasta, joka on ominaista kaikille R4xx-sarjan kylmäaineille. Näitä kylmäaineita kutsutaan tsetrooppisiksi kylmäaineiksi. Liukuma johtuu siitä, että kylmäaineseos koostuu eri kylmäaineista, joiden höyrystymislämpötila on toisistaan poikkeava. Näin ollen seoksen eri komponentit höyrystyvät eri aikaan. Rajakäyrän oikealla puolella, tulistetun höyryn alueella, isotermit laskevat.

Kylmäprosessin tilapiirroksesta on helposti laskettavissa teho, mikäli koneiston massavirta tiedetään

$$\Phi = q_m \Delta h \quad (16)$$

ϕ on teho [kW]

q_m on massavirta [kg/s]

Δh on entalpian muutos [kJ/kg]

Jos massavirta ei ole tiedossa, voidaan teho laskea myös, mikäli tiedetään kompressorin tilavuusvirta sekä kylmäaineen ominaistilavuus kuvan 4 pisteessä 1

$$\phi = q_v/v \Delta h \quad (17)$$

ϕ on teho [kW]

q_v on kompressorin imutilavuusvirta [m^3/s]

v on ominaistilavuus kompressorin imuaukossa [m^3/kg]

Δh on entalpian muutos prosessissa [kJ/kg]

2.6 Kylmäkoneikon hyötysuhde

Kylmäkoneiston taserajan sisällä pätee kaavassa 13 esitetty energiaperiaate. Höyrystimen sitoma lämpöenergia Q_0 ja kompressorin tekemä työ W ovat yhtä kuin lauhduttimen luovuttama lämpö Q_L . Kylmäprosessin hyötysuhdetta voidaan kuvata kylmäkertoimella ε , joka määritellään kaavalla

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} \quad (18)$$

Vastaavasti voidaan määrittää prosessin lämpökerroin φ

$$\varphi = \frac{Q_L}{W} \quad (19)$$

Hyötysuhteesta käytetään yleisemmin nimeä *coefficient of performance*, eli COP. Tällä voidaan tapauksesta riippuen tarkoittaa joko kylmäkerrointa tai lämpökerrointa. Koska log p, h -tilapiirroksessa kylmäaineen lämpösisältö h [kJ/kg] esitetään lineaarisella asteikolla, voidaan hyötysuhde määrittää myös entalpian muutoksen suhteena, tai yhtä hyvin laskemalla muutoksen suhde etäisyyksien suhteena. Lopputulos on sama, koska COP on dimensioton luku.

Kylmäprosessin hyötysuhdetta verrataan usein maksimaaliseen teoreettiseen hyötysuhteeseen eri lämpötilatasojen välillä toimivalle ns. käänteiselle Carnot-prosessille. Tällaista ideaalisesti toimivaa laitetta kutsutaan Carnot-koneikoksi, ja sille voidaan määrittellä kylmäkerroin

$$\varepsilon_{Carnot} = \frac{T_0}{T_L - T_0} \quad (20)$$

T_0 on matalampi lämpötilataso [K]

T_L on korkeampi lämpötilataso [K]

Vastaavasti voidaan määrittää Carnot-lämpökerroin

$$\varphi_{Carnot} = \frac{T_L}{T_L - T_0} \quad (21)$$

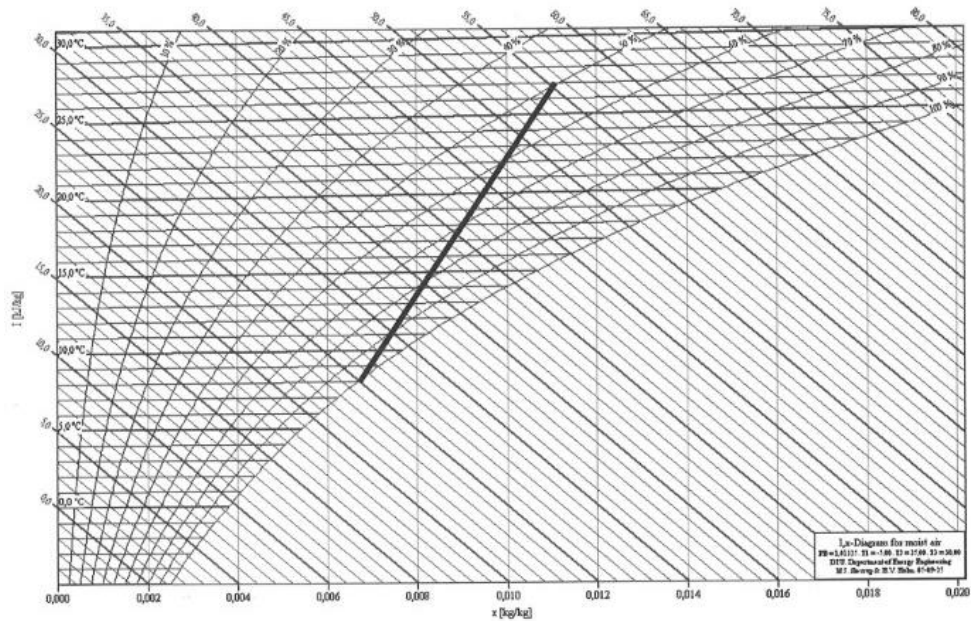
T_L on korkeampi lämpötilataso [K]

T_0 on matalampi lämpötilataso [K]

Mikään todellinen kylmäkoneikko ei voi saavuttaa Carnot-kylmä- tai -lämpökerrointa, koska Carnot-prosessi on täysin häviötön.

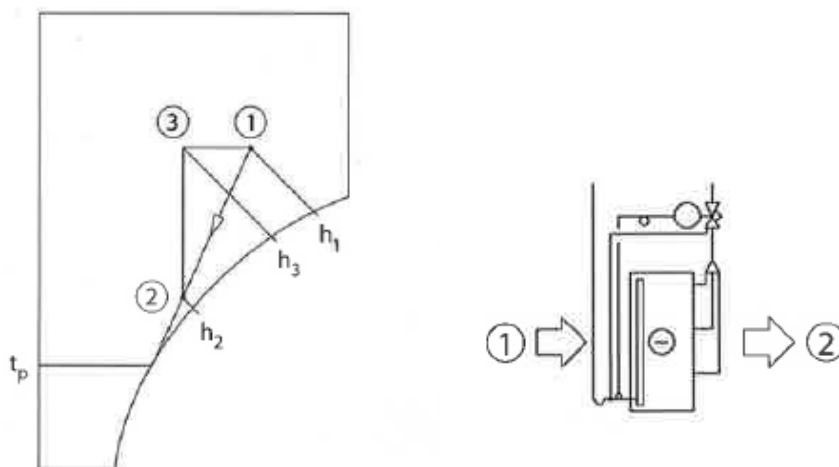
2.7 Ilman jäähdytys

Suorahöyrysteiseen kylmäprosessiin perustuvaan ilman jäähdytykseen käytettävä höyrystin siirtää ilmasta lämpöä höyrystyvään kylmäaineeseen. Ilmankäsittelyprosessi piirretään usein kostean ilman Mollier-piirroksen, joka on esitetty kuvassa 5. Kuvan esimerkissä ilman lämpötila on höyrystimelle tullessa 27 °C ja suhteellinen kosteus 50 %. Höyrystimeltä poistuu ilmaa, jonka lämpötila on 8 °C ja suhteellinen kosteus 100 %. Todellisuudessa poistuvan ilman suhteellinen kosteus jää alle 100 %:n.



Kuva 5. Ilman jäädytys vakiolämpöisellä jäädytyspatterilla [4, s. 262].

Höyrytimessä, jonka läpi virtaa kosteaa ilmaa, tapahtuu aina veden kondensoitumista, mikäli höyrytimen pintalämpötila on alempana kuin ilman kastepiste. Tämä on se lämpötila, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Tähän veden faasimuutokseen kuluva jäädytysteho on ilman kuivaukseen tarvittava teho. Tuntuva jäädytysteho taas on se teho, joka on mitattavissa ilman kuivan lämpötilan alenemana höyrytimen läpi virratessaan. Yhdessä nämä muodostavat kokonaisjäädytystehon. Teho jakautuu samassa suhteessa kuin kuvassa 6 esitetty entalpiamuutos.



Kuva 6. Ilman jäädytys vakiolämpöisellä jäädytyspatterilla ja entalpiamuutokset [4, s. 261].

Prosessi on esitetty pisteestä 1 pisteeseen 2, ja se suuntautuu kohti höyrystimen va-
kiopintalämpötilaa t_p . Kokonaisjäähdytysteho lasketaan kaavalla

$$\Phi = q_v \rho (h_1 - h_2) \quad (22)$$

ϕ on kokonaisjäähdytysteho [kW]

q_v on kostean ilman tilavuusvirta [m^3 kosteaa ilmaa/ s]

ρ on kuivan ilman tiheys [kg kuivaa ilmaa/ m^3 kosteaa ilmaa]

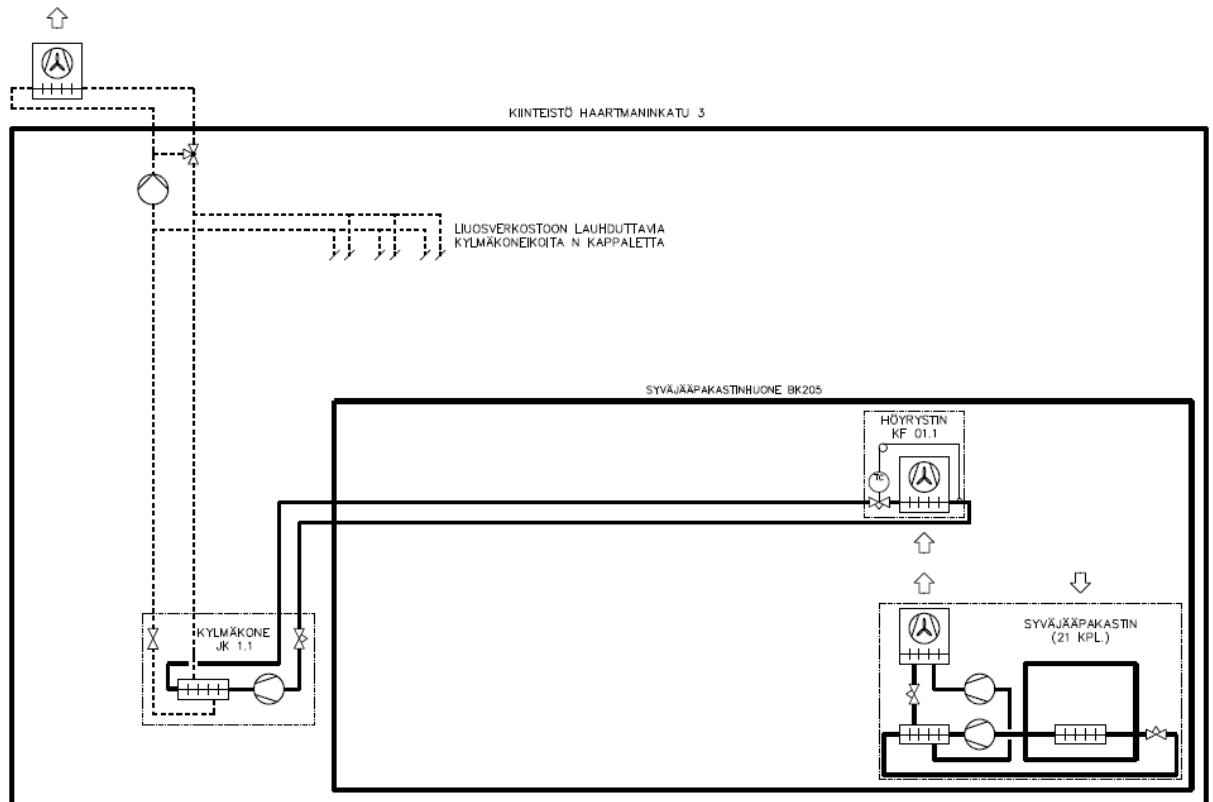
h_1 on ilman entalpia ennen jäähdytystä [kJ/kg]

h_2 on ilman entalpia jäähdytyksen jälkeen [kJ/kg]

Vastaavasti tuntuva jäähdytysteho lasketaan entalpian erotuksena $h_3 - h_2$ ja kuivaus-
teho erotuksen $h_1 - h_3$ avulla. Tuntuvan jäähdytystehon osuus kasvaa pintalämpötilan
 t_p lähestyessä ilman kastepistettä. Kuivaustehosta käytetään yleisemmin nimitystä vie-
märiin menevä teho, mikä kuvaa hyvin sen hyödyttömyyttä. Mikäli tarkoituksena on ilman
jäähdytysprosessissa laskea vain lämpötilaa, pitää jäähdytyspatterin lämpötila mitoittaa
kastepisteen yläpuolelle.

2.8 Taserajojen määrittely

Tarkastelun kohteena olevan syväjäähdytyskonehuoneen BK205 lämpökuormien ja jääh-
dytysjärjestelmän ymmärtämisen kannalta on välttämätöntä määrittää taserajat ja läm-
mönsiirto niiden yli. Taserajat ja lämmönsiirtotekniikat on esitetty periaatekaaviossa ku-
vassa 7. Kuvaan on piirretty yksinkertaistettuna yksi syväjäähdytyskonehuoneeseen, yksi
syväjäähdytyskonehuonetta jäähdyttävistä neljästä koneikoista sekä liuosverkosto ja liuok-
sen jäähdytin, jotka siirtävät lämmön ulkoilmaan.



Kuva 7. Taserajat ja lämmönsiirto niiden yli.

2.8.1 Ensimmäinen taseraja, syväjäähäpakastin

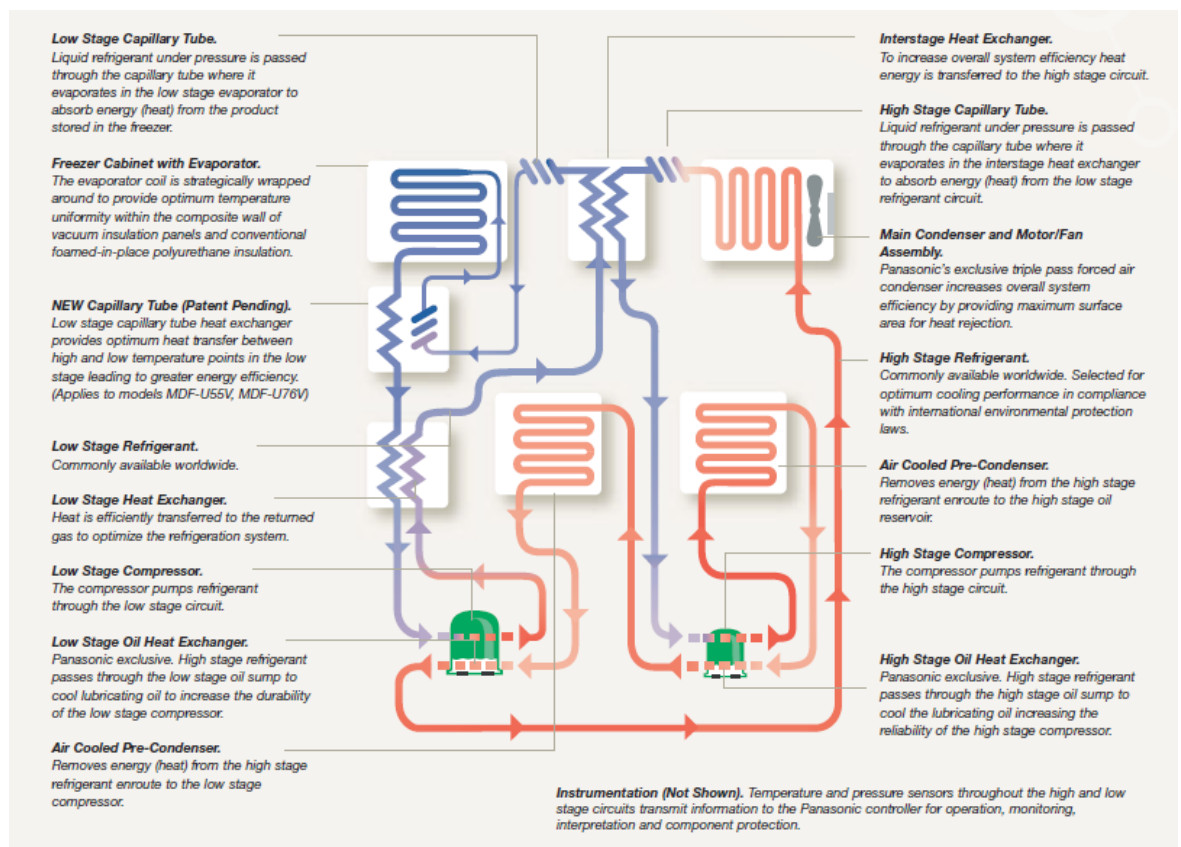
Periaatekuvassa 7 on esitetty ensimmäisenä taserajana syväjäähäpakastimen ulkovaippa. Pakastimen sisällä pyritään pitämään hyvin matala lämpötila. Pakastimessa säilytettävistä näytteistä riippuen lämpötila voi olla jopa -130 °C . Tällaisia syväjäähäpakastimia tilassa on vain kaksi kappaletta. Suurimman osan syväjäähäpakastimista sisälämpötila pyritään pitämään tasolla -80 °C . [4.]

Syväjäähäpakastimien sähköverkosta ottamasta energiasta suurin osa kuluu vaipan lämpöpöhäviöiden kattamiseen. Tämän vuoksi pakastimen ympäristön lämpötilalla on suuri vaikutus energian kulutukseen. Lähtötilanteessa lämpötila pakastinhuoneessa oli 26 °C . Tällöin syväjäähäpakastimen Carnot-kylmäkertoimeksi muodostuu kaavan 22 mukaan, pakastimen sisälämpötilan ollessa -80 °C , seuraavasti:

$$\varepsilon_{\text{Carnot}0} = \frac{273,15 - 80}{(273,15 + 26) - (273,15 - 80)} = 1,82 \quad (23)$$

Koska lämpöä siirretään hyvin matalasta lämpötilatasosta huonelämpötilaan, ei tämä ole enää mahdollista toteuttaa yhdellä kompressorilla tai yhdellä kylmäaineella. Syväjäähdytyskoneistoissa käytetäänkin kahta toisiinsa kaskadilämmönsiirtimen kautta kytkettyä kylmäkoneikkoa (kuva 8), joissa on eri kylmäaine. Siirrin toimii matalalämpötilakompressorin lauhduttimena ja korkealämpötilakompressorin höyrystimenä. Matala-astekylmäkoneikko siirtää lämpöä matalasta lämpötilasta välilämpötilaan, ja korkea-astekylmäkoneikko siirtää lämmön välilämpötilasta pakastimen ympäristöön.

Matala-astekoneikon kylmäaine valitaan niin, että se höyrystyy syväjäähdytyskoneiston sisälämpötilaa alemmassa lämpötilassa ja mielellään paineessa, joka ylittää ilmakehän paineen. Yleensä tämä aine on useamman kylmäaineen seos. Korkea-astekoneikoissa on aina viime päiviin asti käytetty kylmäainetta R404A. Tämä on kuitenkin poistuva kylmäaine, johtuen sen suuresta ympäristövaikutuksesta.



Kuva 8. Syväjäähdytyskoneiston kaskadikylmäkoneisto [5, s. 6].

2.8.2 Toinen taseraja, syväjäähdytyskabinetti BK205

Syväjäähdytyskabinetti on tarkastelun toinen taseraja. Tilan lämpökuorma muodostuu pääsääntöisesti syväjäähdytyskabinettien kylmälaitteiden lämpökuormasta. Tilan valaistus ja muut lämpökuormat ovat merkityksettömiä tässä tarkastelussa. Ilmanvaihdolla sen sijaan on merkitystä, ja sitä tullaan tarkastelemaan erikseen myöhemmin tässä työssä.

2.8.3 Kolmas taseraja, kiinteistön ulkovaippa

Tämä taseraja esitetään lähinnä kuriositeettina. Rajan sisällä pätee edelleenkin energia-periaate: sisäenergian muutos on yhtä kuin systeemiin tehty työ ja systeemin lämpöenergian muutos. Tarkastelun kohteena oleva jäähdytyskoneikko JK 1.1 siirtää lämpösisältöään liuosverkostoon JK350 kuvan 7 mukaisesti. Kuten kuvasta voidaan todeta, liittyy järjestelmään JK350 myös useita muita kylmälaitteita.

3 Kohteen tiedot ja lähtötilanne

3.1 Syväjäähdytyskabinetti BK205

Opinnäytetyön aiheena on Haartmaninkatu 3:n syväjäähdytyskabinettiin BK205 olosuhteiden parantaminen ja vaikutukset energian säästöön. Kiinteistössä on neljä syväjäähdytyskabinettiä, mutta tämä projekti kohdistuu huoneeseen, jossa on ilmeisiä ongelmia jäähdytyksen riittävydessä.

Huone BK205 sijaitsee kiinteistön 2. kellarikerroksessa. Tilan mitat ovat 25,2 m x 2,9 m x 2,7 m, ja siellä on yhteensä 21 kpl syväjäähdytyskabinettiä sekä yksi tavallinen -20 °C :n kaappikabinetti. Kahden syväjäähdytyskabinettin sisälämpötilan asetusarvo on -130 °C , ja muiden asetusarvo on -80 °C . Yhden syväjäähdytyskabinettin sisältö on suojattu CO_2 -häätäjähdetyksellä vikatilanteessa. Huoneessa on hyvin suuri lämpökuorma, ja vaikka sen sisälämpötilan asetusarvo on 18 °C , ei nykyisillä jäähdytyslaitteilla päästä lähellekään tätä arvoa.

3.2 Syväjäähdytyskonehuoneen jäähdytyslaitteisto

3.2.1 Höyrystimet

Pakastinhuonetta jäähdyttää neljä suora höyrysteistä Chiller KDC 12 C -kattojäähdytyskasettia, joista tarkastelun kohteena oleva KF 01.1 on esitetty kuvassa 9. Kaseteilla on omat seinätermostaatit ja jäähdytyskoneikot. Kaikki jäähdytyspiirit ovat erillisiä, mutta koneikot on rakennettu kuvassa 12 olevaan yhteiseen konepakettiin, joka sijaitsee konehuoneessa BK214.



Kuva 9. Chiller KDC 12 C -kattojäähdytyskasetti, lämpötilan mittausturit kuvassa ympyröity.

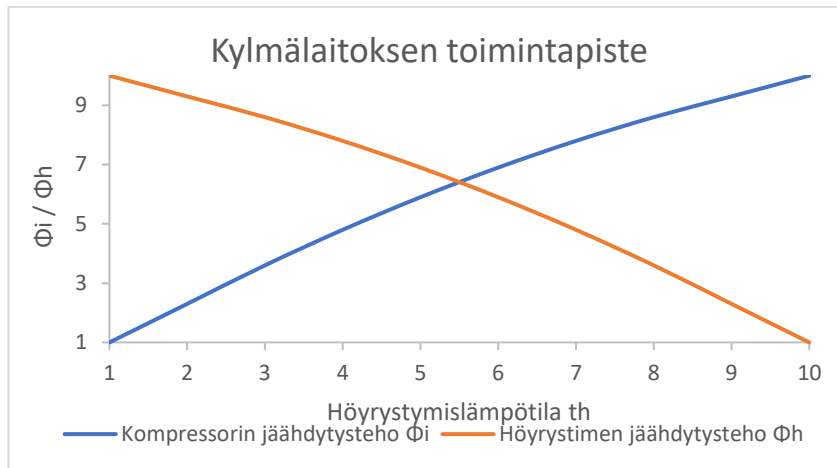
Kattojäähdytyskaseteista ei ole saatavana kaikkia mitoitustietoja kuten lämmönsiirto-pinta-alaa. Kuvassa 10 on Chiller KDC/KDCH -kasettipatterien teknisiä tietoja. Chiller Oy:n esitteen mukaan KDC 12 -kasettipatteri tuottaa 12,8 kW:n jäähdytystehon GFL 300-kompressorilauhduttimen kanssa. Teho on ilmoitettu puhaltimen suurimmalla kierrosluvulla, kun huoneen kuivalämpötila on 27 °C ja märkälämpötila 19 °C. Puhaltimen ilmamäärä on 560 l/s, joka vastaa ilmavirtaa 2016 m³/h. [6, s. 4.]

Kasettipatteri KDC, KDCH Kompressorilauhdutin esim.	2*04 GFL250	2*06 GFL 300	10 GFL250	12 GFL 300
Jäähdytysteho kW	9,3	12,8	9,3	12,8
Ilmämäärä l/s	420	560	420	560
Läpäisyteho patteri W	160	210	160	210
Käytännön virta patteri A	0,38	0,60	0,38	0,60
Virtalaji patteri V-ph-Hz	230-1-50			

Kuva 10. Chiller-kasettipatteri KDC/KDCH:n tekniset tiedot [6, s. 4].

Höyrystinkasettien puhaltimia on jouduttu uusimaan sitä mukaa kun ne ovat hajonneet. Alkuperäisiä puhaltimia ei ole enää saatavilla, ja korvaavan moottorin kierrosluku on 25 % pienempi kuin alkuperäisen. Niissä höyrystimissä, joissa puhallinmoottori on jouduttu korvaamaan, tämä on johtanut jäähdytystehon alenemaan. Myös höyrystymislämpötila on laskenut pakkasen puolelle, mikä on edelleen johtanut höyrystimen lämmönsiirtokennon ajoittaiseen jäätymiseen. Tätä ongelmaa on yritetty hallita asettamalla kasettien piirikortille sulatusjaksot. Jakson aikana kompressori ja magneettiventtiili ohjataan kiinni, ja puhaltimet kierrättävät ilmaa. Lämmin ilma sulattaa kennoon kertyneen jään vedeksi, joka johdetaan viemäriin. Varsinkin kesällä ongelma on ollut merkittävä johtuen ilman korkeasta absoluuttisesta kosteudesta. Tästä syystä sulatukset on asetettu tapahtumaan 45 minuutin välein ja kestämään 15 minuuttia. Näin ollen jäähdytyskoneiden käyntiaikasuhteeksi muodostuu 18 h/vrk. Vaikka osa jäähän sitoutuneesta latentista lämmöstä saadaan hyödyksi sulatusjakson aikana, on laitteistojen kokonaisjäähdytysteho laskenut niin matalaksi, että se ei enää vastaa syväjäähdytyskoneen lämpökuormaa.

Koska höyrystimen jäähdytysteho on puhaltimien uusimisen johdosta laskenut, on tämä johtanut epäsuhtaan kompressorin ja höyrystimen jäähdytystehojen välillä. Jäähdytyskoneikon toimintapiste on kuvan 11 mukaisesti höyrystimen ja kompressorin jäähdytystehon leikkauspiste. Kuvasta voidaan todeta, että tiettyä höyrystymislämpötilaa vastaa jäähdytysteho, johon sekä kompressorin että höyrystimen jäähdytysteho ajautuu.



Kuva 11. Kylmälaitoksen toimintapiste.

3.2.2 Jäähdytyskompressorit

Jäähdytyskompressorit ovat mallia Copeland TFD 522/ZR40K3E Scroll-kompressori. Prosessin kylmäaineena on R407C. Taulukossa 1 on esitetty kompressorin jäähdytysteho ja ottoteho lauhtumislämpötilan t_c ja höyrystyslämpötilan t_e funktiona.

Taulukko 1. Kompressorin Copeland TFD 522/ZR40K3E tehotaulukko [7].



Model: ZR40K3E-TFD
Capacity

R407C

Cooling capacity [kW]

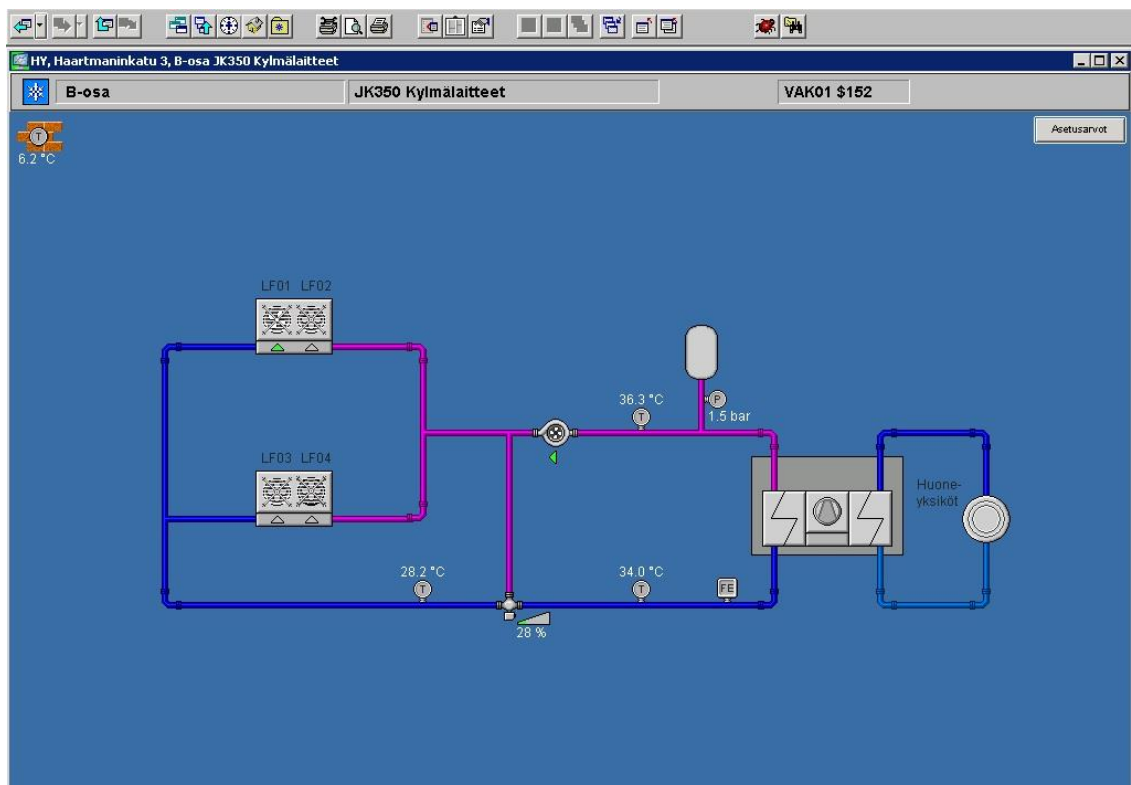
$t_c \setminus t_e$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15
30	3.42	4.33	5.47	6.84	8.43	10.26	12.32	14.62
35	3.17	4.06	5.17	6.50	8.05	9.84	11.85	-
40	2.92	3.77	4.84	6.12	7.62	9.35	11.30	-
45	-	3.48	4.49	5.71	7.15	8.81	10.69	-
50	-	-	4.13	5.28	6.65	8.22	10.01	-
55	-	-	-	4.83	6.11	7.59	9.28	-
60	-	-	-	-	5.55	6.92	8.51	-
65	-	-	-	-	-	6.23	7.69	-

Power input [kW]

$t_c \setminus t_e$	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15
30	1.68	1.67	1.67	1.66	1.65	1.64	1.61	1.56
35	1.90	1.90	1.90	1.89	1.88	1.86	1.82	-
40	2.15	2.15	2.15	2.15	2.14	2.11	2.07	-
45	-	2.43	2.44	2.44	2.42	2.39	2.35	-
50	-	-	2.76	2.76	2.75	2.71	2.66	-
55	-	-	-	3.12	3.11	3.07	3.01	-
60	-	-	-	-	3.52	3.48	3.41	-
65	-	-	-	-	-	3.94	3.86	-

3.2.3 Lauhdutus ja lämmönsiirto

Koneiden lauhdutus on toteutettu levylämmönsiirtimillä verkostoon B-JK350. Verkoston paluuliuksen asetusarvo on 34 °C. Liuos kiertää B-osan vesikatolla sijaitsevalla liuosjäähdyttimellä vakionopeuspumpun avulla, ja paluuliuosta säädetään kolmitieventtiilillä sekä ohjaamalla liuosjäähdyttimen puhaltimien käyntiä. Kuvassa 12 on esitetty liuospiirin kytkentäkaavio ja säätöpiiri. Kuvakaappaus on otettu Siemens Visonik -kiinteistöautomaatiojärjestelmästä. Kuvaan on piirretty vain yksi jäähdytyskone, mutta todellisuudessa näitä on noin 20 kappaletta.



Kuva 12. Siemens Visonik -automaatiojärjestelmä, JK350-kylmälaitteet.

Levylämmönsiirtimet ovat mallia SWEP B80Hx30. Lämmönsiirtimen ensiöpuolella on lauhtuva kylmäaine R407C ja toisiopuolella 35 %:n glykoliliuos. Lauhtumista ei säädetä aktiivisesti, vaan liuosvirtaama levylämmönsiirtimillä on säädetty huippukuormituksen mukaan kertosäätöventtiileillä.

3.2.4 Jäähdytyskoneikko

Kuvassa 13 on esitetty kylmäkoneikko, joka sijaitsee huoneessa BK214, tekninen tila. Koneikko on Chiller Oy:n tehtaalla valmistama, ja siinä on neljä erillistä kylmäainepiiriä. Levylämmönsiirtimet on sijoitettu koneikon sisälle.



Kuva 13. Chiller-kompressorikoneikko B272 ja digitaalinen asennusmittari Testo 570.

3.2.5 Ohjaukset, varolaitteet, hälytykset

Jäähdytyksen tarvetta ohjataan neljällä huonetermostaatilla. Jokainen termostaatti ohjaa omaa kattojäähdytyskasettiaan. Kompressoreiden käyntiä ohjataan rinnakkain magneettiventtiilin kanssa. Laitteistossa ei ole pumppaus-kytkentää. Höyrystinpuhaltimet käyvät jatkuvasti, ja sulatustarvetta ohjaavat kattojäähdytyskasetit. Sulatus perustuu kiinteään sulatusaikaan, joka asetetaan kasetin piirikortille. Sulatusaikana kompressori ja magneettiventtiili ohjataan seis. Puhaltimet käyvät jatkuvasti.

Kompressoreiden käyntiä rajoittamaan on asennettu matala- ja korkeapainekytkimet. Kytkimillä suojellaan kompressoria lauhtumisen häiriötilanteessa sekä kylmäainevuodon tai kylmäainekierron häiriön sattuessa. Koneikolta on otettu yhteishälytys kiinteistöautomaatiojärjestelmään. Lisäksi syväjäähdytyskoneikossa on kaksi kiinteistöautomaatiojärjestelmään kytkettyä huonelämpötila-anturia, joista saadaan yllämpöhälytykset.

3.3 Tilan ilmanvaihto

Syväjääpakastintilan BK205 ilmanvaihto ei lähtötilanteessa toimi niin kuin sen pitäisi. Tilaan on johdettu viisi 125 mm:n tuloilmakanavaa, joiden päätelaitteet on jossain vaiheessa tuntemattomista syistä johtuen poistettu. Vastaavat viisi 125 mm:n poistoilmakanavaa taas sijaitsevat tekniikkaseinän takana eri tilassa. Tekniikkatilaan johtaa viisi ovea, joiden ovirakojen kautta poistoilman on ajateltu kulkeutuvan poistoille.

Sekä tulo- että poistoilman päätelaitteet ovat mallia Halton KSO, joka on poistoilmapäätelaitte. Kyseistä päätelaitetta on käytetty tuloilmalaitteena ilmeisesti siitä syystä, ettei tuloilman heittokuviolle ole asetettu tavoitteita. Tilan ilma sekoittuu hyvin johtuen tilan neljästä kattojähdytyskasetista sekä syväjääarkkujen lauhdutinpuhaltimista.

3.4 Syväjääpakastimet, tilan lämpökuorma

Syväjääpakastinhuoneen fyysinen koko on ainoa tekijä, mikä rajoittaa tilaan sijoitettujen syväjääarkkujen lukumäärää. Projektin alussa tilaan oli sijoitettu 21 syväjääpakastinta ja yksi tavallinen pakastin (liite 1). Tilan lämpökuorma on tämän vuoksi tilan kokoon nähden hyvin suuri. Huone on pitkä ja kapea, ja pakastimet on sijoitettu aivan vierekkäin. Syväjääpakastimien lauhduttimien aiheuttamista pistemäisistä lämpökuormista johtuen tilan tasaisen lämpötilan hallinta on hyvin haastavaa. Jäähdytystä ohjaavien termostaattien sijoituksella on suuri merkitys tasaisen lämpötilan saavuttamiselle. Jäähdytysjärjestelmän alkuperäisiä suunnitteludokumentteja ei ole saatavilla. Oletuksena on, että jäähdytyslaitteisto on alun perin suunniteltu pienemmälle lämpökuormalle.

3.5 Hätäjäähdytys

Syväjääpakastinhuoneen jäähdytysjärjestelmä on haavoittuvainen, vaikka jäähdytys on jaettu neljään eri piiriin. Häiriö esimerkiksi liuosverkoston kiertovesipumpulla aiheuttaa sen, että kaikki jäähdytysyksiköt menevät korkeapainekatkaisusta häiriötilaan. Tästä syystä tilaan on asennettu hätäjäähdytysjärjestelmä, joka perustuu kylmään käyttöveeseen.

Tilaan on asennettu katon rajaan kolme puhallinjäähdytyspatteria mallia Alfa Laval PCG 108. Yksi hätäjäähdytyspattereista on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Hätäjäähdytyspatteri Alfa Laval PCG 108.

Hätäjäähdytystilanteessa jäähdytyspatterien kylmän käyttöveden sulkuventtiilit sekä viemäriventtiilit avataan ja puhaltimet käynnistetään kuvassa 15 näkyvästä ohjauskeskuksesta. Hätäjäähdytys ei ole taloudellinen ratkaisu, mutta se on hyvin toimintavarma ja tehokas.

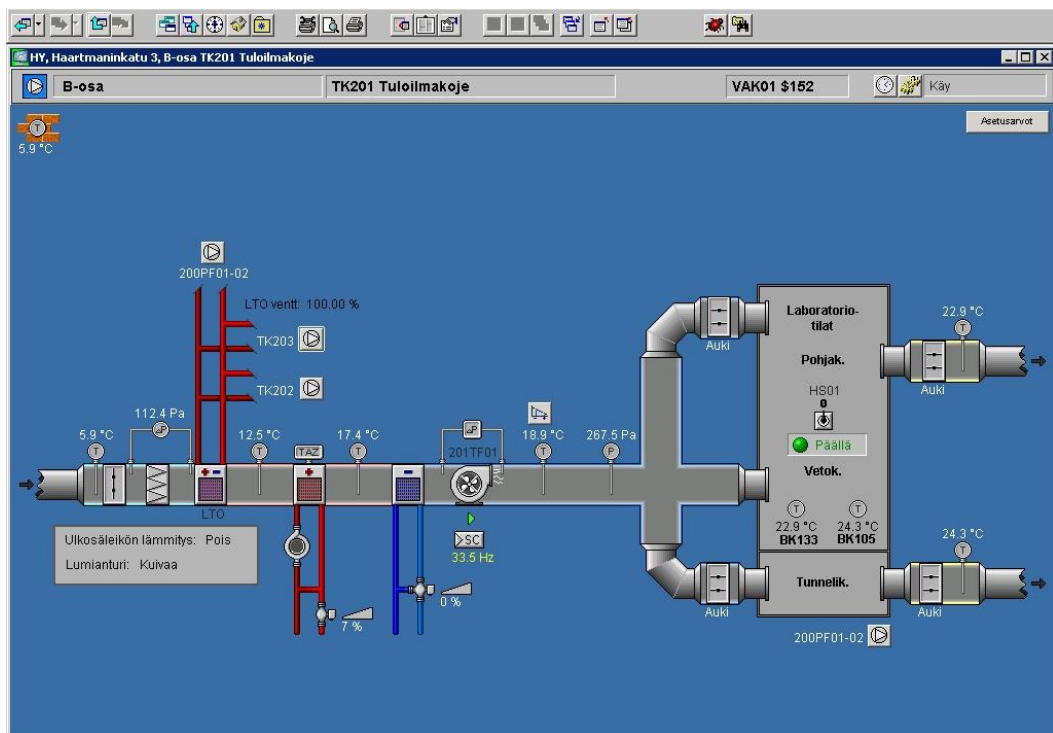


Kuva 15. Lämpötila-anturi, jäähdytysyksikön säädin ja hätäjäähdytyksen ohjauskeskus.

4 Ilmanvaihdon parannusratkaisut

4.1 Tuloilmakoje

Syväjääpakastinhuone BK205 kuuluu kuvassa 16 esitetyn tuloilmakoje TK201:n palvelualueeseen. Tuloilman sisäänpuhulluslämpötilaa ohjataan poistoilman lämpötilan mukaan, ja sen maksimiarvo on 21 °C. Minimisisäänpuhulluslämpötila on asetusarvon mukaan 19 °C. Kuten kuvasta voidaan todeta, on tuloilmakojeessa jäähdytyspatterit. Tämän johdosta tuloilman lämpötila voidaan kesälläkin pitää asetusarvossaan. Tuloilma myös jonkin verran kuivaa jäähdytyksen ansiosta, vaikka kojeessa ei olekaan jälkilämmityspatteria.



Kuva 16. Siemens Visonik -automaatiojärjestelmä, tuloilmakoje TK201.

4.2 Tuloilma tilaan BK205

Lähtötilanteessa syväjääpakastinhuoneen tuloilman päätelaitteet oli poistettu. Tästä syystä johtuen ei ollut mielekästä mitata tuloilmavirtaa, vaan sen todettiin olevan monikertainen tarvittavaan nähden. Tarvittava tuloilmavirta päätettiin selvittää laskennallisesti.

Yksi huoneen syväjäärkuista on suojattu häiriötilanteessa nestemäisellä hiilidioksidilla, joka höyrystyy normaali-ilmanpaineessa lämpötilassa $-78,1\text{ °C}$ [8, Kylmäaineet 3]. Syväjäähdytysjärjestelmän häiriötilanteen sattuessa nestemäistä hiilidioksidia ruiskutetaan säiliöstä pakastimen sisälle, jossa se höyrystyessään sitoo lämpöä ympäristöstään. Hiilidioksidin purkausmäärä ja -nopeus tilaan on noin $60\text{ kg}/2\text{ vrk}$, ja purkauksen jälkeen säiliö on tyhjä. Mitoittavaksi tekijäksi otettiin hiilidioksidin pitoisuus $5\,000\text{ ppm}$ (HTP 8 h). Tätä varten luotiin excel-laskenta-arkki (liite 2), jolla voidaan laskea tarvittava ulkoilmavirta tilaan. Laskennan tulokseksi saatiin 42 l/s , jota verrattiin myös RakMK D2:n minimiulkoilmavirtaan $0,35\text{ l/s/m}^2$. Laskennallinen tulos on suurempi, joten kokonaistuloilmavirta päätettiin säätää tähän arvoon.

4.3 Tuloilman säätö

Tuloilman säätöä varten kaikki päätelaitteet asennettiin paikoilleen ja kanavaliitokset tiivistettiin. Koska poistoilmalaitteet sijaitsevat tekniikkatilan seinän takana, käytävän ovet teljettiin mittauksen ajaksi auki. Tarvittava ilmavirta kerrottiin varmuuskertoimella 1,1 ja jaettiin päätelaitteiden lukumäärällä. Tämä ilmavirta asetettiin säädön tavoitteeksi.

Ilmavirrat säädettiin mittaamalla paine-ero päätelaitteen yli TSI 8702 -paine-eromittarilla sekä mittaamalla päätelaitteen avauma. Valmistaja Haltonin taulukosta luettiin avaumaa vastaava k-arvo ja virtaama laskettiin kaavalla

$$q_v = k \times \sqrt{\Delta P_m} \quad (24)$$

Säädössä ei pyritty aivan tasaiseen ilmavirtaan päätelaitteiden kesken. Kuten aiemmin on todettu, ilma sekoittuu tilassa hyvin. Päätelaittekohtaiset tuloilmavirrat on esitetty liitteessä 3.

4.4 Poistoilma

Syväjäähdytystila on pitkä ja kapea. Tilan pitkällä sivulla on väliseinä, jonka takana on tekniikkatila. Tila on osastoitu väliseinillä niin, että jokaiseen tekniikkatilaan johtaa ovi, ja jokaisessa tilassa on yksi poistoilmalamin. Poistoilman johtaminen syväjäähdytystilasta tekniikkatilan poistoilmalaminille on ilmeisesti ajateltu toteutettavan siirtoilmana ovirakojen kautta. Ovirakojen pinta-ala on kuitenkin vaatimaton siirrettävään ilmavirtaan

nähdessä. Tästä syystä oviin päätettiin lisätä siirtoilmasäleiköt Halton TVC 300X150. Tekniikkatilan väliovi, oviraot ja siirtoilmasäleikkö on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Tekniikkatilan ovi, oviraot ja siirtoilmasäleikkö Halton TVC 300X150.

Säleikköjen lisäämisen jälkeen poistoilman päätelaitteiden ilmavirrat säädettiin. Tavoitteeksi otettiin saattaa tilan BK205 ilmanvaihto tasapainoon. Päätelaittekohtaiset poistoilmavirrat on esitetty liitteessä 3.

5 Jäähdytysprosessi, lähtötilanne

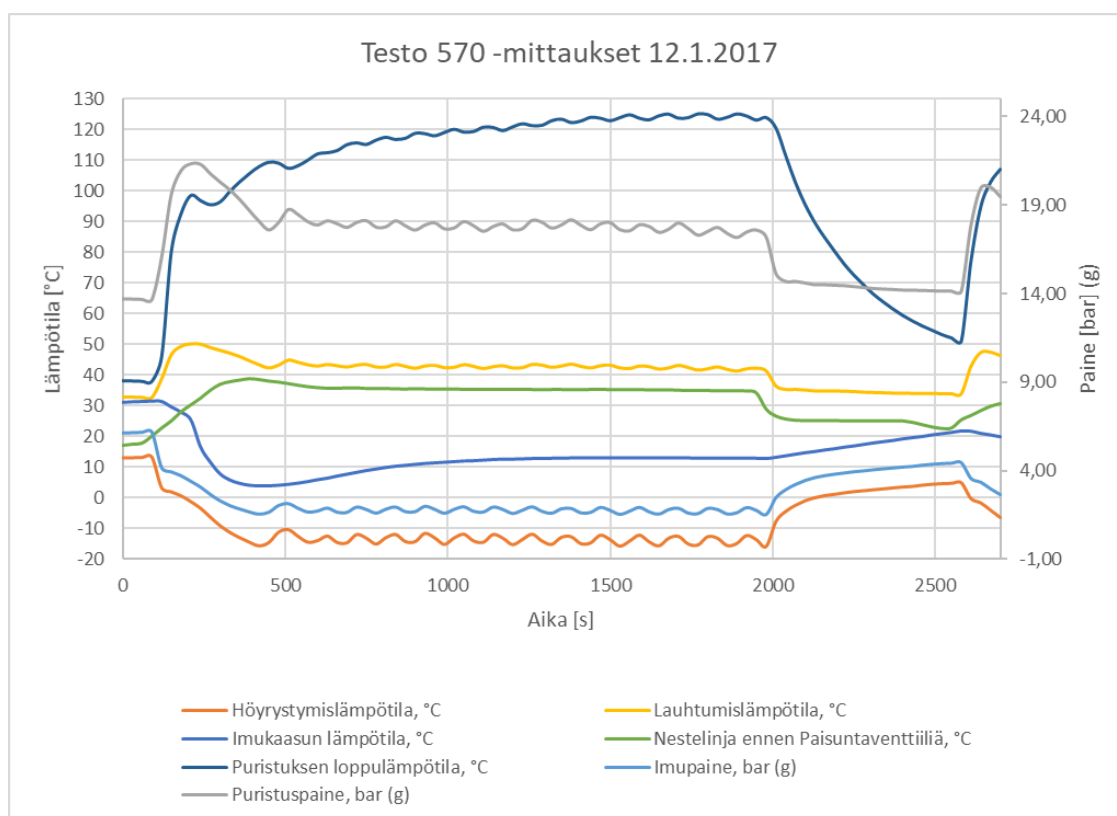
5.1 Kylmäkoneikon mittaukset

Jotta jäähdytysjärjestelmään tehtävien muutosten vaikutusta tilan olosuhteisiin ja toisaalta energian kulutukseen voidaan verrata, täytyy lähtötilanne ja muutosten jälkeinen tilanne dokumentoida tarkkaan. Tästä syystä johtuen päätettiin mitata muutostyön kohteena olevan koneikon osalta tarvittavat paineet ja lämpötilat, jotta kylmäprosessi lähtötilanteessa voidaan määrittää.

5.1.1 Paine- ja lämpötilamittaukset

Kylmäkoneikon paine- ja lämpötilamittaukset suoritettiin 12.1.2017. Mittausjärjestelyssä kuvassa 13 oleva digitaalinen asennusmittari Testo 570 kytkettiin tarkasteltavaan kylmäpiiriin JK 1.1. Mittarin matala- ja korkeapainemittarit kytkettiin koneikon huoltoyhteisiin.

Mittarin pintalämpötila-anturit asetettiin mittaamaan kuumakaasuputken lämpötilaa heti kompressorin jälkeen ja imuputken lämpötilaa juuri ennen kompressoria. Mittaustulosten kirjaamisväliksi asetettiin 30 sekuntia ja mittaustapahtumien määräksi 500 mittausta. Ennen mittauksia varmistettiin, että järjestelmässä on tarpeeksi kylmäainetta ja että koneikko toimii niin kuin sen on suunniteltu toimivan. Kylmäainekierrossa ei ollut mitään poikkeavaa lievää paisuntaventtiilin huojuntaa lukuun ottamatta. Höyrystinpuhaltimet kävivät ja suodattimet olivat puhtaat. Mittaukset aloitettiin klo 12:05:10, ja niitä jatkettiin klo 12:50:10 asti. Tällä aikavälillä kone ehti käydä yhden käyntijakson.



Kuva 18. Testo 570 -mittaukset 12.1.2017.

Mittauksista tehtiin mittauspöytäkirja (liite 4), johon valittiin tietoalueet kylmäprosessin määrittämistä varten. Mittaustuloksista luotiin myös graafinen kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 18. Kuvaajasta voidaan todeta, milloin kylmäkone käynnistyy ja pysähtyy sekä koneen painetasot ja niitä vastaavat lämpötilat. Kuvassa lämpötilamittaukset on sidottu vasemman puoleiseen y-akseliin ja painemittaukset oikean puoleiseen. Paisuntaventtiilin huojunta on todettavissa kompressorin painetasojen ja niitä vastaavien lämpötilojen aaltomaisista käyristä.

Kylmäprosessi ei ole vakio, vaan se muuttuu kuormituksesta riippuen ajan funktiona. Prosessin määrittämistä varten on siis valittava hetki, jolloin sitä tarkastellaan. Mittauspöytäkirjasta (liite 4) valittiin hetki $t_0 = 1050 \text{ s}$, jolloin prosessi on kohtalaisen vakaa ja kuormitus tasainen.

5.1.2 Kompressorin virtamittaus ja teho

Kompressorin sähköverkosta ottama teho voidaan lukea valmistajan tehotaulukosta (taulukko 1), jossa teho on esitetty höyrystymis- ja lauhtumislämpötilan funktiona. Taulukosta voidaan iteroida hetkellä t_0 kompressorin jäähdystystehoksi n. 4,2 kW ja sähkötehoksi n. 2,3 kW. Vertailun vuoksi teho päätettiin myös laskea mittaamalla kompressorin ottama virta.

Kompressorin virta mitattiin pihtiampeerimittarilla Kaise Miniclamp. Virta mitattiin kaikista kolmesta vaiheesta, ja virtalukemat kirjattiin muistiin muutaman minuutin välein koneen stabiiliin käyntijakson aikana (liite 4). Kolmivaihemoottorin, joka siis on kyseisen kompressorin tehonlähde, tehon laskemiseksi voidaan käyttää kaavaa

$$P = \sqrt{3} U I \cos\varphi \quad (25)$$

P on teho [W]

U on pääjännite [V]

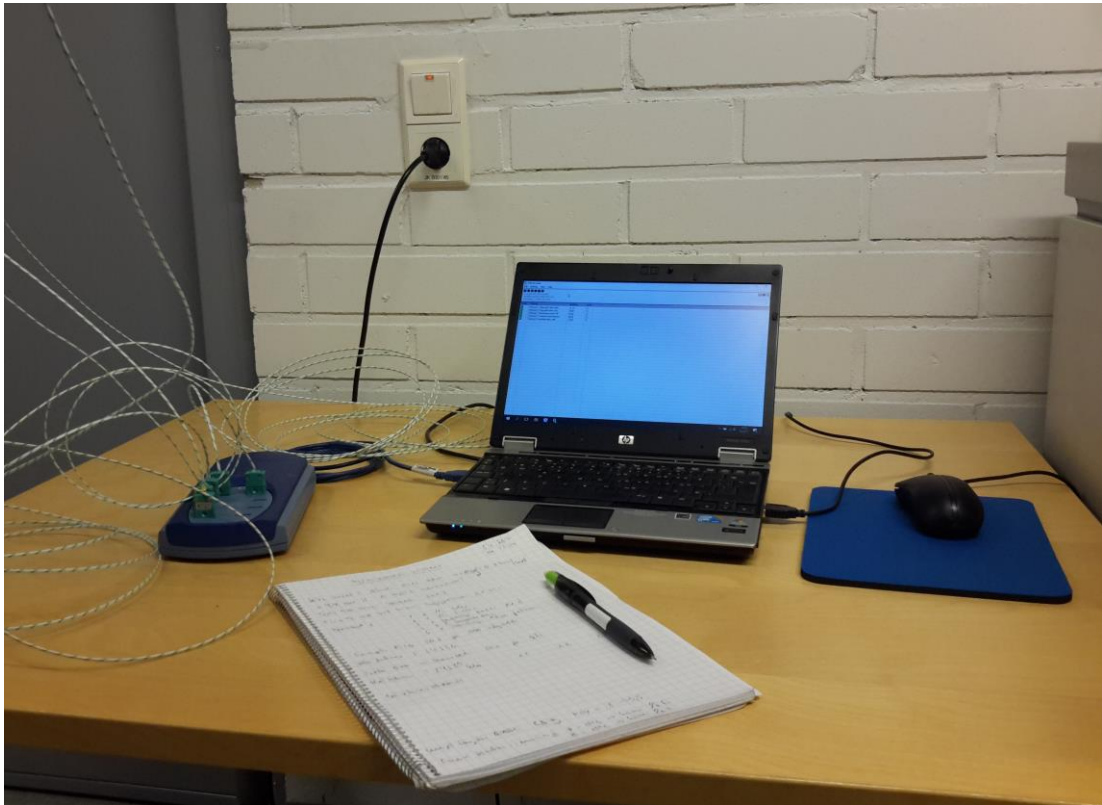
I on virta [A]

$\cos\varphi$ on tehokerroin

Virtamittauksista laskettiin lähinnä hetkeä t_0 vaiheiden L1, L2 ja L3 aritmeettinen keskiarvo, jota käytettiin tehon kaavassa. Pääjännite tarkistettiin yleismittarilla Fluke 78, ja sen todettiin olevan riittävällä tarkkuudella 400 V. Kaavassa $\cos\varphi$ on dimensioton luku, joka kuvaa pätötehon suhdetta näennäistehoon. Näin ollen moottorin hyödyksi saatava teho on sitä suurempi, mitä parempi on moottorin $\cos\varphi$. Maksimiarvo $\cos\varphi$:lle on 1. Kompressorivalmistajan tiedoista ei ollut saatavissa kyseisen kompressorin $\cos\varphi$ -lukua, joten sen arvioitiin olevan IE2-luokituksen mukaan 0,85 [9]. Kompressorin tehoksi saatiin kaavalla 25 laskien n. 2,94 kW, joka on 28 % suurempi kuin laitevalmistajan ilmoittama arvo. Jatkolaskelmissa päädyttiin käyttämään virtamittaukseen perustuvaa arvoa.

5.2 Höyrystimen mittaukset

Samaan aikaan koneikon mittauksen yhteydessä perustettiin mittausjärjestely höyrystimeen KF 01.1 liittyvien lämpötilojen selvittämiseksi. Jotta kylmätekniikan prosessi voitaisiin selvittää, täytyi lisätä myös lämpötila-anturi mittaamaan nestelinjan lämpötilaa juuri ennen paisuntaventtiiliä. Mittauksiin käytettiin kuvassa 19 pöydällä vasemmalla olevaa dataloggeria Pico TC-08 USB. Loggerin anturit ovat nopeasti reagoivia K-tyyppin antureita. Mittaustulokset tallennettiin kannettavalle tietokoneelle jatkokäsittelyä varten.



Kuva 19. Höyrystimen mittaukset, Pico TC-08 USB.

Höyrystimeltä mitattiin imuilman lämpötila ennen höyrystintä sekä lämpötila höyrystimen jälkeen (puhallusilma). Imuilman lämpötila mitattiin keskeltä ensimmäisen kasettiosan imuaukkoa. Puhallusilman lämpötila ei ole aivan vakio, vaan se riippuu mittauspisteestä. Kokeilemalla haettiin piste, joka edustaa keskimääräistä arvoa ja jossa lämpötila ei juurikaan vaihtelee tasaisen kuormituksen aikana. Antureiden sijoitus näkyy kuvassa 9.

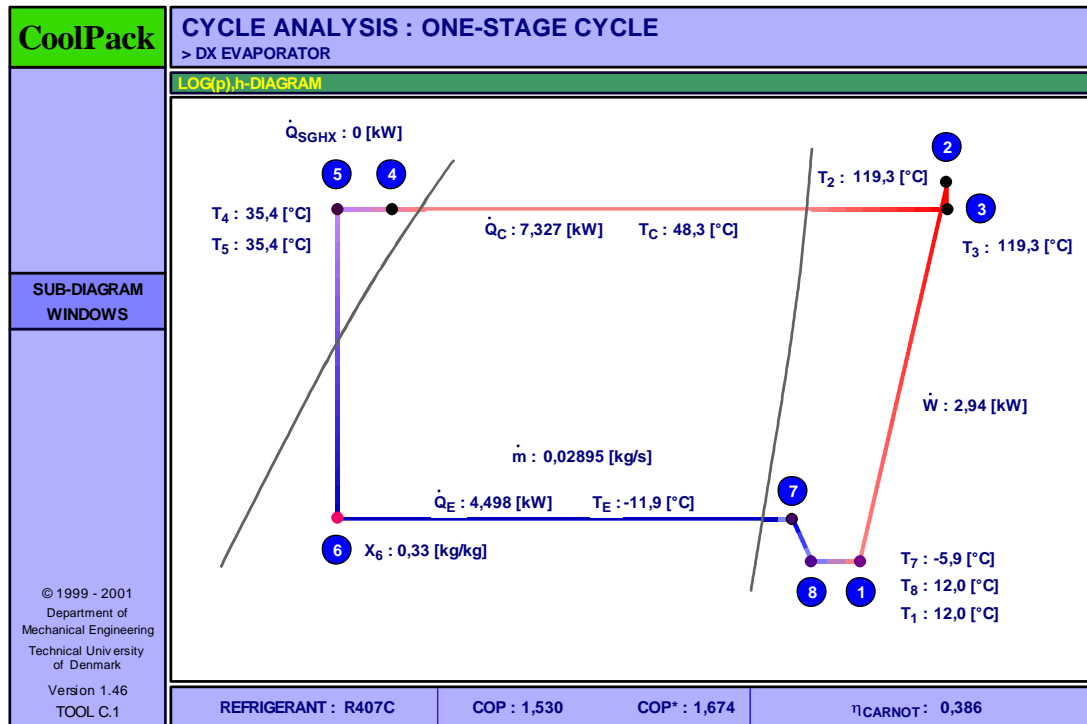
5.3 Tuloilman mittaus

Tuloilman lämpötila mitattiin lähinnä höyrystintä KF 01.1 olevasta päätelaitteesta. Tuloilman lämpötila ei suoranaisesti vaikuta hetkelliseen jäähdytysprosessiin, mutta lämpötila päätettiin kuitenkin mitata samalla höyrystimen KF 01.1 mittausten kanssa. Liitteestä 4 voidaan todeta, että lämpötila pysyy mittausten ajan hieman yli 21 °C:ssa. Mittaushetkellä ei valitettavasti ollut käytössä suhteellisen kosteuden mittaria, joten kosteus jäi mitaamatta.

5.4 Jäähdytyslaitteiston kylmäprosessi

Mittausten tulosten pohjalta piirrettiin kylmäprosessi käyttäen apuna IPU-yhtiön kehittämää CoolPack-ohjelmaa. Prosessi on esitetty kuvassa 20. Kuten edellä on todettu, ei kylmäprosessi ole yleensä stabiili, vaan se riippuu useista tekijöistä kuten kuormituksesta, lauhtumisesta ja säädön vakaudesta. Prosessi on piirretty hetkellä $t_0 = 1050$ s mittauksen alusta laskettuna, jolloin prosessi oli ehtinyt tasaantua ja käyntijakso lähestyi puoliväliä.

Prosessin kuvaajassa piste 1 on kylmäaineen paine- ja lämpötilataso kompressorin imuaukossa. Pisteiden 2 ja 3 erotus on lauhduttimen painehäviö, vaikkakin ohjelma ilmoittaa molemmille pisteille saman lämpötilan. Pisteet 4 ja 5 ovat samat, koska prosessiin ei liity imukaasun lämmönsiirrintä. Pisteestä 6 pisteeseen 7 esitetään jäähdytyskohteessa hyödyksi käytettävissä oleva kylmäteho. Pisteiden 7 ja 8 erotus on imulinjassa tapahtuva hyödytön tulistuminen. Prosessi sulkeutuu pisteeseen 1, joka on sama kuin piste 8. Tämä johtuu, samoin kuin edellä, siitä ettei järjestelmässä ole sisäistä lämmönsiirrintä.



Kuva 20. CoolPack-ohjelma, kylmäprosessi lähtötilanteessa.

CoolPack-ohjelman log p, h -tilapiirros osoittaa selkeästi kylmäprosessin ongelmakohdat. Höyrystimen kylmäteho on liian pieni kompressorin kylmätehoon nähden. Kylmäprosessi ajautuu toimintapisteeseen, joka on taloudellisesti ja toiminnallisesti epäedullinen. Prosessin COP on hyvin alhainen, eli 1,530. Höyrystymislämpötila on lähes $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, mikä aiheuttaa höyrystimen lämmönsiirtopinnan jäätymistä. Jää toimii eristeen tavoin, ja heikentää lämmönsiirtymistä höyrystyvään kylmäaineeseen. Jää myös tukkii ilman virtauskanavia aiheuttaen painehäviötä ja siten pienentäen ilmavirtaa. Koneikon jäähdytysteho on vain 4,5 kW, ja ylisuuresta tulistuksesta johtuen kuumakaasun lämpötila on hyvin korkea, lähes $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Matalasta höyrystymislämpötilasta johtuen kylmäaine myös tulistuu imulinjassa huomattavan paljon.

6 Kylmäsuunnitelma

6.1 Uusi höyrystin

Kylmäsuunnitelman keskiössä on uuden höyrystimen valinta vastaamaan kompressorin kylmätehoa. Mikäli kyseessä olisi uusi laitteisto, olisi suunnitelman laadinta helpompaa. Tällöin voitaisiin määrittää tarkasti taserajan sisällä kylmätehontarve ja valita kaikki tarvittavat komponentit näiden laskelmien pohjalta. Näin ei kuitenkaan ole, vaan päämääränä on saattaa olemassa oleva laitteisto mahdollisimman pienin muutoksin toimimaan varmasti, luotettavasti ja taloudellisesti.

Uuden höyrystimen valintakriteereinä ovat jäähdytystehon kasvun ohella prosessin höyrystymislämpötilan nostaminen 0 °C:n yläpuolelle. Tämä on ensiarvoisen tärkeää, jotta voidaan välttää höyrystimen lämmönsiirtopinta-alan jäätyminen. Samalla poistuu myös höyrystimen sulatusjakson tarpeellisuus. Höyrystymislämpötilan nostaminen vaikuttaa myös ilman jäähdytyksen tuntuvaan tehoon kasvattaen sen osuutta kokonaisjäähdytystehosta. Uuden höyrystimen tavoitteelliseksi höyrystymislämpötilaksi valittiin 6 °C.

Jotta uusi höyrystin voitaisiin valita oikein, täytyy määrittää kompressorin kylmäteho valituissa olosuhteissa. Tavoitteelliseksi lauhtumislämpötilaksi valitaan 45 °C. Koska kompressorin imulinja aiheuttaa noin 1 K:n painehäviön, saadaan höyrystymislämpötilaksi kompressorilla 5 °C. Taulukosta 1 luettuna on kompressorin kylmäteho näissä olosuhteissa 8,81 kW.

Uudeksi höyrystimeksi valittiin Rivacold MDF 23503 -puhallinhöyrystin. Höyrystimen valmistajan valintataulukko (taulukko 2) rajoittuu 15 °C:n huonelämpötilaan ja lämpötilaeroon 10 °C huonelämpötilan ja höyrystymislämpötilan välillä (solut väritetty sinisellä). Tästä syystä tehotaulukkoon on mallinnettu lisää tehoja. Mallinnus tehtiin käyttäen excel-tilukkolaskentaohjelman funktiota, joka jatkaa matemaattista sarjaa perustuen ilmoitettuihin tehoihin. Mallinnetut solut ovat taulukossa värittämättömällä alueella. Höyrystimen kylmäteho aiemmin määritellyissä olosuhteissa on noin 9,5 kW (taulukko 2, keltainen solu).

Taulukko 2. Rivacold RDF 23503:n tehotaulukko, osittain mallinnettu [10].

RIVACOLD RDF 23503 Höyrystin.

Jäähdytysteho[W] huonelämpötilan Tc ja huonelämpötilan ja höyrystyslämpötilan erotuksen dT funktiona

dT\Tc	-5	0	2	4	6	8	10	12	15	18
15	10693	11190	11228	11265	11303	11340	11378	11589	11905	12222
14	9896	10359	10396	10433	10470	10507	10544	10738	11030	11322
13	9099	9528	9564	9601	9637	9673	9710	9888	10155	10423
12	8302	8697	8733	8768	8804	8840	8876	9037	9280	9523
11	7506	7866	7901	7936	7971	8006	8042	8187	8405	8623
10	6699	7029	7062	7095	7128	7161	7194	7359	7607	7855
9	5929	6226	6266	6305	6345	6384	6424	6512	6644	6776
8	5148	5401	5434	5467	5500	5533	5566	5643	5759	5875
7	4268	4477	4503	4530	4556	4583	4609	4675	4774	4873
6	3509	3696	3727	3758	3788	3819	3850	3916	4015	4114
5	2750	2915	2950	2985	3021	3056	3091	3157	3256	3355

Mallinnettu teho värjättyalueella

6.2 Putkisto, komponentit**6.2.1 Putkisto**

Putkiston ja siihen liittyvien komponenttien mitoituksista ei ole olemassa muuta suunnittelutietoa kuin suunnitelmakevat ja toteutus. Tämän vuoksi putkimitoitusta tarkistettiin putkimitoitustaulukoista uuden laskennallisen tehon pohjalta. Tässä yhteydessä todettiin, että nestelinja oli liian pieni. Linjakoko päätettiin muuttaa putkikoosta Cu 10 kokoon Cu 12. Muiden putkien ja putkistokomponenttien mitoitus vastasi uuden höyrystimen tehoa.

6.2.2 Käynnistyssäädin

Kylmäkoneikon lauhtumista ei säädetä kuormituksen mukaan, vaan lauhtuttimena toimivan levylämmönsiirtimen toisiovirtaama (glykoliliuos) on vakio. Tämän vuoksi järjestelmään päätettiin asentaa käynnistyssäädin (kuva 21), joka rajoittaa kompressorin imu-paineen säätöarvoon. Tällä saavutetaan se etu, että laitteiston maksimikuormitustilanne voidaan määritellä ja lauhtumispaine säätää vastaamaan kyseistä tilannetta.



Kuva 21. Danfoss KVL käynnistyssäädin [11].

7 Asennukset

Asennukset suoritettiin kylmäsuunnitelman pohjalta 3.–7.4.2017. Koneikon nestelinja vaihdettiin yhtä kokoa isommaksi. Uusi höyrystin asennettiin vanhan tilalle, ja siihen liitetyvät paisuntaventtiili sekä magneettiventtiili uusittiin. Höyrystimen kondenssivesiputki kytkettiin viemäriin ja putkistot eristettiin.

Höyrystintä ohjaava mekaaninen termostaatti vaihdettiin tarkempaan elektroniseen malliin, jossa on lämpötilanäyttö. Höyrystinpuhaltimet kytkettiin niin, että ne pyörivät aina kun jäähdytyskoje on käyttökytkimestä kytkettynä päälle. Termostaatti ohjaa rinnakkain magneettiventtiiliä sekä kompressoria kuten ennenkin. Sulatusjaksoja ei aseteltu säätimeen, koska niitä ei pitäisi jatkossa tarvita. Tarvittaessa ne on kuitenkin helppo lisätä.

Koneikon JK 1.1 yhteyteen asennettiin Danfoss KVL -käynnistyssäädin. Myös koneikon kuivainpatruuna vaihdettiin, ja järjestelmän kylmäainetäytös vaihdettiin. Tämän jälkeen koneikko oli valmis käynnistystä, koeajoa ja säätöä varten.

8 Jäähdytysprosessi, lopputilanne

8.1 Koneikon mittaukset

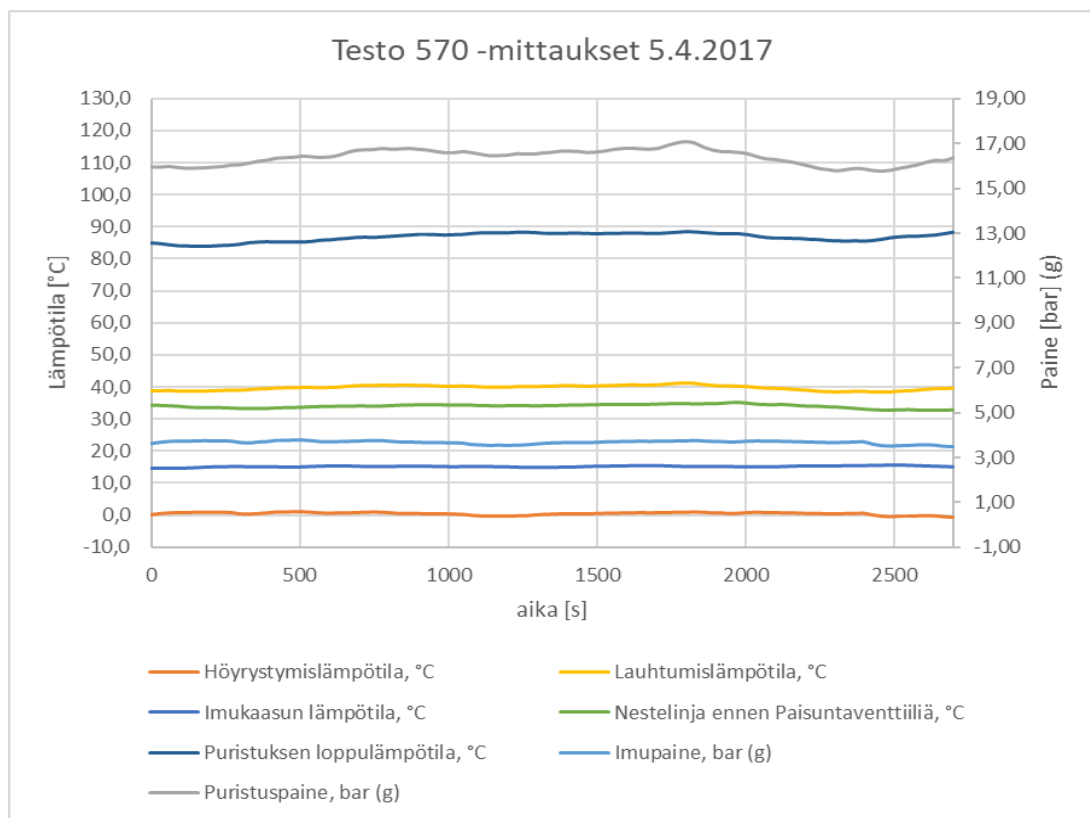
8.1.1 Koneikon koekäyttö, säätö ja siihen liittyvät mittaukset

Koneikko JK1.1 käynnistettiin 5.4.2017 klo 14:00. Koekäytön alkuvaiheessa säädettiin höyrystimen paisuntaventtiili, ja tämän jälkeen säädettiin käynnistyssäädin. Säätö ase-

tettiin tasolle 4,4 bar (g), jolloin säädin ei normaalikuormitustilanteessa rajoita imupainetta. Paine vastaa lämpötilaa 5,2 °C log p, h -piirroksen kylläisen höyryn rajakäyrällä. Lauhtumispaine säädettiin maksimikuormitustilanteessa tasolle 18 bar (g), joka vastaa lauhtumislämpötilaa 48,2 °C. Sääto toteutettiin kuristamalla lauhduttimena toimivan levylämmönsiirtimen toisiopuolen virtausta kertäsäätöventtiilistä lukemaan 5,5. Samalla mitattiin venttiilin painehäviö, jonka lukemaksi saatiin 0,265 bar. Mittalaitteena käytettiin virtausmittaria TA CBI II. Toisiopuolen virtaama luettiin linjasäätöventtiilin säätötaulukosta, ja sille saatiin lukema 0,24 dm^3/s (liite 5).

8.1.2 Paine- ja lämpötilamittaukset

Mittausjärjestely toistettiin mahdollisimman tarkasti samoin kuin ennen muutoksia. Lähtötilanteesta poiketen nyt mitattiin myös imulinjan lämpötila juuri höyrystimen jälkeen, jotta paisuntaventtiili voitaisiin säätää. Kun koneikkoon liittyvät säädöt oli saatu tehtyä, käynnistettiin kylmäprosessin mittaus klo 14:36:20. Mittauksia jatkettiin 15:21:20 asti, ja niistä tehtiin mittauspöytäkirja (liite 6), johon valittiin tietoalueet kylmäprosessin määrittämistä varten.



Kuva 22. Testo 570 -mittaukset 5.4.2017

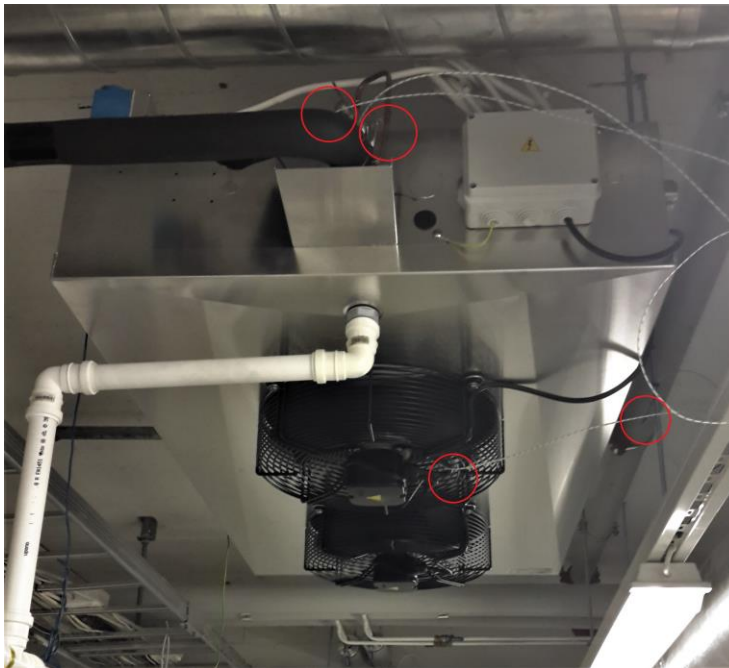
Mittaustuloksista luotiin myös graafinen kuvaaja, joka on esitetty kuvassa 22. Kuvaajasta voidaan todeta, milloin kylmäkone käynnistyy ja pysähtyy sekä koneen painetasot ja niitä vastaavat lämpötilat. Myös levylämmönsiirtimelle tulevan ja sieltä poistuvan liuoksen lämpötila mitattiin. Lämpötilaeroksi saatiin lähinnä hetkeä t_1 10,4 K.

8.1.3 Kompressorin virtamittaus ja teho

Kompressorin sähköverkosta ottama uusi teho luettiin valmistajan tehotaulukosta (taulukko 1). Taulukosta iteroitiin hetkellä t_1 kompressorin jäähdytystehoksi 7,5 kW ja sähkötehoksi 2,4 kW. Kompressorin ottama teho myös laskettiin samoin kuin lähtötilanteessa mittaamalla kompressorin ottama virta samoin kuin alussa. Uudeksi laskennalliseksi tehoksi saatiin 2,87 kW.

8.2 Höyrystimen mittaukset

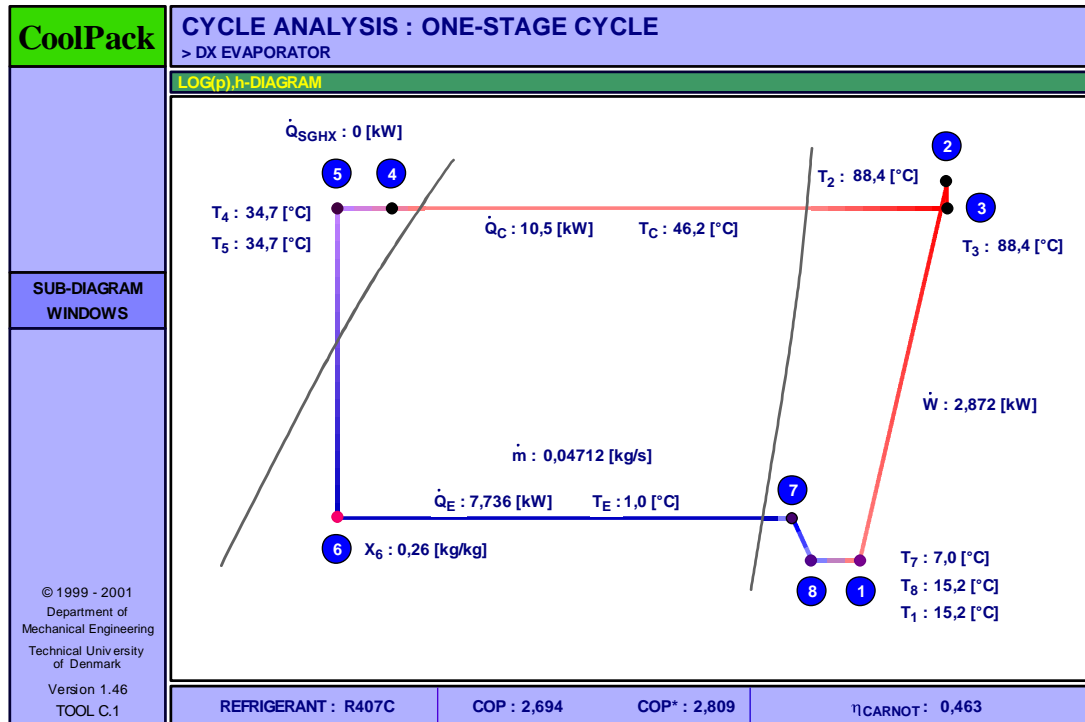
Uusi höyrystin Rivacold RDF 23503 on esitetty kuvassa 23. Höyrystimen mittausjärjestely toistettiin samoin kuin aiemmin sillä erotuksella, että nyt mitattiin myös imulinjan lämpötila juuri höyrystimen jälkeen. Antureiden sijoitus on merkitty kuvaan punaisella ympyrällä. Mittauksista tehtiin mittauspöytäkirja (liite 6).



Kuva 23. Uusi höyrystin Rivacold RDF 23503

8.3 Jäähdytyslaitteiston kylmäprosessi

Mittausten tulosten pohjalta piirrettiin uusi kylmäprosessi. Prosessin määrittämistä varten valittiin hetki $t_1 = 1830 \text{ s}$ mittauksen alusta laskien, jolloin kuormitus oli tasaista ja kylmäprosessi oli suhteellisen stabiili. Uusi kylmäprosessi piirrettiin CoolPack-ohjelmalla samoin kuin lähtötilanteessa. Prosessi on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. CoolPack-ohjelma, kylmäprosessi lopputilanteessa.

Kylmäprosessi on määritetty tilanteessa, jossa jäähdytettävän tilan keskilämpötila oli jopa $7 \text{ }^\circ\text{C}$ viileämpi kuin lähtötilanteessa. Näin ollen prosesseja ei voida suoraan verrata toisiinsa. Jäähdytyslaitteiston asetusarvo lähtötilanteessa oli $18 \text{ }^\circ\text{C}$, mutta huoneen lämpötila oli lähes $26 \text{ }^\circ\text{C}$. Nyt laitteiston asetusarvo oli $19 \text{ }^\circ\text{C}$, ja se saavutti helposti halutun lämpötilan.

Höyrystyslämpötila on nyt $1 \text{ }^\circ\text{C}$, eli matalampi kuin tavoite. Laitteistoa tullaan kuitenkin käyttämään huonelämpötilan asetusarvossa $20 \text{ }^\circ\text{C}$, jolloin höyrystyslämpötila nousee hieman. Kompressorin puristuksen lämpötila on n. $30 \text{ }^\circ\text{C}$ matalampi. Tämä johtuu lähinnä siitä, että höyrystyslämpötila on noussut n. $13 \text{ }^\circ\text{C}$ ja kylmäaine tulistuu huomattavasti vähemmän ennen kompressoria.

9 Jälkitarkastelu, energiansäästö

9.1 Ilmanvaihto

Tulo- ja poistoilmavirran rajoittaminen vain tarvittavaan määrään säästää puhaltimen sähköenergiaa sekä ilmanvaihdon tarvitsemaa lämmitys- ja jäähdytysenergiaa. Tilaa palveleva tuloilmakone TK201 (kuva 16) on paineohjattu. Kanavapaineelle on asetettu arvo, johon taajuusmuuttaja ohjattu tuloilmakone nostaa paineen kierrosnopeussäädöllä. Affiniteetilakien mukaan ilmavirta on suoraan verrannollinen kierrosnopeuteen, joka on suoraan verrannollinen puhaltimen taajuuteen. Tarvittava teho suhtautuu kierrosnopeuden, ja samalla taajuuden kolmanteen potenssiin. Tästä seuraa, että jos tarvittava ilmavirta voitaisiin tiputtaa puoleen, laskisi tehontarve kahdeksasosaan alkuperäisestä.

Tilan ilmavirrat laskivat murto-osaan lähtötilanteeseen verrattuna. Ilmavirtoja alussa ei mitattu, joten tästä syystä tarkkaa vaikutusta energian säästöön ei voida laskea. Tilaa palvelevien tulo- ja poistoilmakoneiden koko on myös niin suuri, ettei ilmavirtojen säädön vaikutusta voitu todeta kojeilla. Toisaalta tärkeämpänä vaikutuksena voidaan pitää tilaan tuloilman mukanaan tuovan kosteuden määrän vähenemistä.

9.2 Kylmäprosessi ja kylmäkoneikko

Prosessin jäähdytyksen COP kasvoi 76,6 %. Jäähdytysteho kasvoi 71,9 %, mutta samaan aikaan kompressorin verkosta ottama teho jopa laski 2,7 % (liite 7, s. 3). Tämä ei niinkään tarkoita uuden järjestelmän erinomaisuutta vaan lähtökohdan huonoutta. Kasvanut kylmäteho näkyy myös suoraan jäähdytyskoneikon käyntiaikasuhteessa, joka laski yli 30 % huolimatta siitä, että tavoiteltu lämpötilataso on alempi.

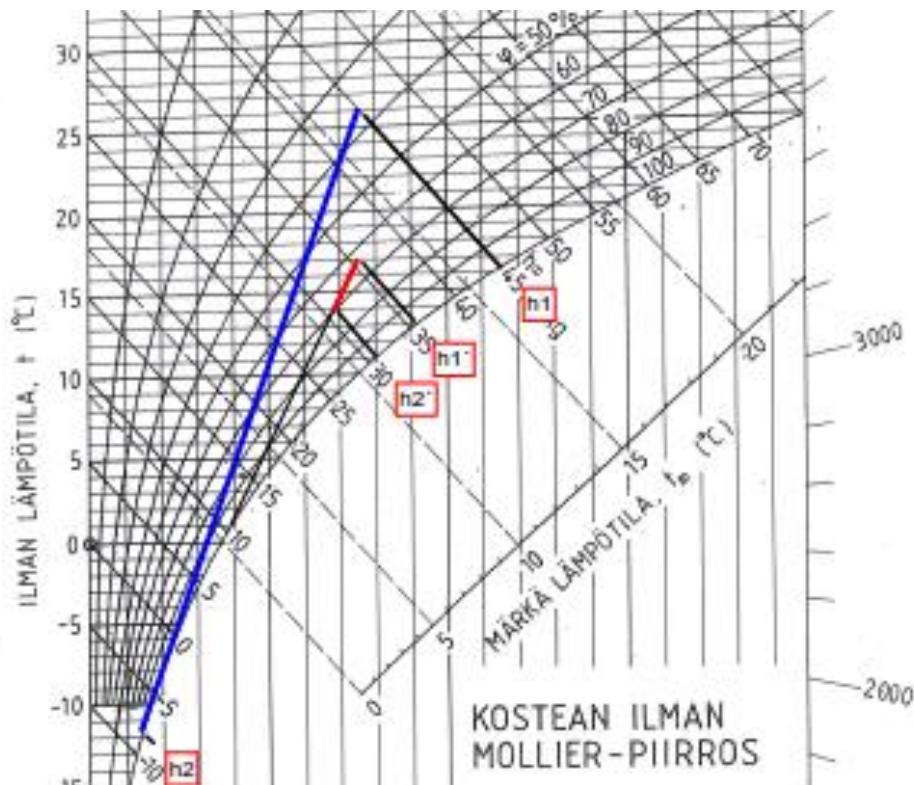
Uuden höyrystimen asennuksen jälkeen höyrystymislämpötila nousi huomattavasti. Myös höyrystimen imu- ja puhallusilman välinen lämpötilaero laski. Uuden höyrystimen puhaltimien heittopituus on myös suurempi kuin vanhan. Tämä vaikuttaa hyvin paljon ilman sekoittumiseen tilassa sekä lämpötilojen tasaantumiseen.

Kylmäkoneikko käy nyt edullisemmissä olosuhteissa, mikä vaikuttaa energiansäästön ohella myös kompressorin käyttöikänsä. Koska tehdyt muutokset koskivat lähinnä höyrystimen vaihtoa, ei laitteistoille tehty elinkaarivertailua. Muutostyölle laskettiin kuitenkin

takaisinmaksuaika perustuen energian säästöön. Tuloksena oli, että koroton takaisinmaksuaika on n. 9,6 vuotta (liite 7, s. 3).

9.3 Höyrystimen jäähdytysteho

Kuten teoriaosuudessa on todettu, kannattaa höyrystimen pintalämpötila valita jäähdytettävän ilman kastepisteen yläpuolelta, mikäli jäähdytystehon ei haluta kuluvaan kuivaukseen. Tämä johtaa kuitenkin usein kohtuuttoman suureen höyrystimen lämmönsiirtopinta-alaan. Höyrystin on siis tältä osin kompromissi laitekoon, käytettävissä olevan tilan ja hankintakustannusten välillä. Kuvassa 25 on esitetty ilman jäähdytysprosessi lähtötilanteessa sinisellä värillä. Entalpiian muutos höyrystimessä on $h_1 - h_2$. Muutosten jälkeinen prosessi on kuvattu punaisella värillä, ja entalpiian muutos on $h_1' - h_2'$.



Kuva 25. Ilman jäähdytysprosessit lähtö- ja lopputilanteessa.

Molemmat prosessit on piirretty lähtötilanteessa, jossa ilman absoluuttinen kosteus on 7,7 g vettä / 1 kg kuivaa ilmaa. Mikäli vanhan ja uuden höyrystimen jäähdytysprosesseja haluttaisiin vertailla tasa-arvoisesti, tulisi molempien imuilman lämpötila ja suhteellinen kosteus olla sama. Kuten kuvasta 25 voidaan todeta, on uuden höyrystimen imuilman

lämpötila 9 °C matalampi kuin vanhan höyrystimen. Tästä syystä uuden prosessin kuivaustehon suhde tuntuvaan tehoon on jopa huonompi kuin aiemmin. Jos uuden prosessin lähtöpiste olisi sama kuin vanhan, tämä johtaisi myös korkeampaan höyrystimen pintalämpötilaan, jolloin tuntuvan jäähdystehon osuus kasvaisi huomattavasti.

Koska prosessit eivät ole vertailukelpoiset, ei tuntuvan jäähdystehon kasvuun perustuvaa energian säästöä voida mitata. Selvää kuitenkin on, että kuivaustehon osuus on pienentynyt, koska höyrystymislämpötila on noussut lähes 13 °C. Huomioitavaa myös on, että olosuhteet jäähdytetyssä tilassa eivät ole vakiot. Ilman suhteellinen kosteus laskee, kunnes tilaan ilmanvaihdon mukanaan tuoman kosteuden ja jäähdytyksen tilasta poistaman kosteuden määrä saavuttaa tasapainotilan.

9.4 Syväjäähdytyslaitteet

Syväjäähdytyslaitteiden energian kulutuksen seurantaan valittiin kaksi pakastinta, jotka sijaitsevat muutostyön kohteena olevan jäähdytyslaitteiston höyrystimen läheisyydessä. Ensimmäiseksi pakastimeksi valittiin pystypakastin Panasonic MDF-U76V, toiseksi arkumallinen Skadi DF9020 GL (liite 1, pakastimet 18 ja 20). Molempien pakastimien tavoitelämpötila on -80 °C, ja ne edustavat kahta päätyyppiä ja -kokoja syväjäähdytyslaitteiden huoneissa.

Kuten edellä on todettu, on syväjäähdytyslaitteiden huone pitkä ja kapea. Tästä johtuen huonelämpötila vaihtelee tarkastelupisteestä ja jäähdytysyksiköstä riippuen hyvinkin paljon. Pakastimien energian kulutusta mitattiin ennen muutoksia kuukauden ajan, jolloin huonelämpötila pakastimien lähellä oli 26 °C. Jäähdytysjärjestelmään tehtyjen muutosten jälkeen mittaus toistettiin lämpötilan ollessa nyt 19 °C. Mittauksiin käytettiin pistorasialliittämättä energiamittareita. Energian kulutuksen muutos laskettiin (liite 7, s. 2) ja vaikka näiden mittareiden tarkkuus ei ole huippuluokkaa, riittää se suhteellisen energian säästön arvioimiseen.

Jäähdytysjärjestelmän muutosten ansiosta pakastinhuoneen lämpötilaa voitiin laskea tarkastelualueella jopa 7 °C. Myös ilmankierto tehostui huomattavasti, ja pistemäisten lämpökuormien vaikutus syväjäähdytyslaitteiden energiatalouteen väheni. Matalammassa huonelämpötilassa myös pakastimen lämpöhäviöt vaipan yli laskivat. Energian kulutuksen suhteellinen muutos on laskettu liitteessä 7. Kahden pakastimen keskimääräinen

energian kulutus alkutilanteessa oli 5 609 kWh vuodessa. Muutosten jälkeen kulutus oli 4 969 kWh vuodessa. Tuloksena oli, että syväjäähdytysjärjestelmien ympäristön lämpötilan muutos laskee niiden energian kulutusta keskimäärin 11,4 %. Takaisinmaksulaskelmassa syväjäähdytysjärjestelmien osuus kokonaissäästöistä on runsas kolmannes.

9.5 Pohdintaa

Tämän insinöörityön kohteena oli suuren tutkimuskiinteistön olemassa oleva syväjäähdytysjärjestelmä ja sen jäähdytys- ja ilmanvaihtoratkaisut. Tarkoituksena oli osoittaa, että pienilläkin muutoksilla näennäisesti oikein toimiviin laitoksiin voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä. Mielestäni tässä onnistuttiin varsin hyvin.

Varsinainen työ vaikutti aluksi hyvin vaatimattomalta, ja epäilinkin saako siitä insinöörityötä kirjoitettua. Sitä mukaa kun työ eteni, kävi kuitenkin selväksi, kuinka paljon siihen liittyy teoriaa ja kuinka syvällisesti aihetta tulisi käsitellä, jotta lukija ymmärtäisi työn tarkoituksen ja sen tulokset. Tähän liittyen työstä tuli laajempi kuin alun perin ajattelin.

Ilmanvaihdon muutokset ja säätö olivat pienimuotoinen osa työtä, mutta niiden vaikutukset jäähdytettävään tilaan tuotavaan kosteuteen, ja siten tuntuvan jäähdytystehon kasvuun, olivat hyvin merkittävät. Insinöörityön keskiössä oli kuitenkin jäähdytyslaitteiston muutostyö ja sen vaikutukset energian säästöön. Tahdoin työssäni osoittaa, miten energia siirtyy taserajojen yli eri muodoissaan ja eri tavoin. Yritin myös tuoda esille sen, miten muutokset yhden taserajan sisällä vaikuttavat koko energiansiirtoketjuun.

Työssä ei keskitytty muutosten absoluuttiseen vaikutukseen energiansäästöissä, vaan alku- ja lopputilanteen suhteelliseen muutokseen. Tästä syystä mittareiden ja mittaustapahtumien virhetarkastelua ei sisällytetty työhön. Kaikki mittaukset suoritettiin samoilla mittareilla ja mittaustapahtumat toistettiin mahdollisimman tarkoin.

Lopputulema on, että tehty työ onnistui hyvin ja sen odotusarvot täyttyivät. Opinnäytetyön arvioinnin jätän muille. Toivon kuitenkin, että lukija löytää siitä elementtejä, jotka herättävät ajatuksia pienten muutosten suurista säästövaikutuksista.

10 Yhteenveto

Tämä insinööri työ tehtiin Helsingin yliopiston Tila- ja kiinteistökeskuksen tilaamana. Insinööri työn kohteena oli yliopiston tutkimuskiinteistön Haartmaninkatu 3:n syväjäähdytys huoneen BK205 olosuhteiden parantaminen ja vaikutukset energian säästöön. Työn tavoitteena oli selvittää syväjäähdytys huoneen ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmän toiminta, tehdä järjestelmiin parannuksia ja tarkastella uutta tilannetta. Alkutilanteessa pakastinhuoneen jäähdytys oli lämpökuorman nähden riittämätön ja se toimi epäedullisissa olosuhteissa. Huoneen ilmanvaihto oli epätasapainossa ja säätämättä.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin lämmönsiirtoon liittyvää teoriaa ja määriteltiin tarkastelun taserajat. Lisäksi esitettiin kylmätekniikkaan liittyvät kaavat ja lainalaisuudet sekä käsiteltiin ilmastoinnin jäähdytysprosessia. Lähteinä käytettiin alan kirjallisuutta. Kohteen tiedot ja lähtötilanne selvitettiin jäähdytettävän tilan, jäähdytyslaitteiston, ilmanvaihdon ja tilan lämpökuorman osalta.

Ilmanvaihdon parannusratkaisut käsittelivät tulo- ja poistoilman mittausta ja säätöä. Pakastinhuoneen puuttuvat tuloilmapäätelaitteet asennettiin paikoilleen. Kanavat tiivistettiin ja tekniikkaseinän oviin asennettiin siirtoilmasäleiköt. Tarvittava ilmanvaihto mitoitettiin ja säädettiin vastaamaan laskennallista tulosta. Mitoitusperusteena käytettiin tilassa olevan yhden syväjäähdytys huoneen CO₂-hätäjäähdytyksen vaikutusta tilan CO₂-pitoisuuteen. Tavoitearvoksi valittiin hätäjäähdytyksen tapahtuessa CO₂-pitoisuus 5 000 ppm (HTP 8 h). Mittaukset tehtiin TSI 8702 -paine-eromittarilla. Säätö tehtiin päätelaitevalmistaja Haltonin taulukkoarvojen avulla. Uudet ilmavirrat tilaan olivat +46,3 / -47,7 l/s.

Jäähdytysprosessi selvitettiin lähtötilanteessa. Tarkasteltavasta koneikosta mitattiin Kaise Miniclamp -pihtiampeerimittarilla kompressorin ottama virta, jonka avulla laskettiin teho. Lisäksi mitattiin kompressorin paineet ja lämpötilat. Höyrystimen osalta mitattiin sisään- ja ulospuhalluksen lämpötilat. Tämän jälkeen kylmäprosessi piirrettiin CoolPack-ohjelman log p, h -tilapiirrokseseen. Mittauksiin käytettiin Testo 570 -asennusmittaria ja Pico TC-08 USB -dataloggeria. Lähtötilanteessa tarkasteltavan kylmälaitoksen jäähdytysteho oli 4,50 kW, kompressorin sähköteho oli 2,94 kW ja COP oli 1,53.

Prosessin ja kompressorin kylmätehon pohjalta tehtiin kylmäsuunnitelma, jossa mitoitettiin ja valittiin laitteistoon asennettavaksi uusi höyrystin Rivacold MDF 23503. Samalla

tarkistettiin putkimitoitus ja suunniteltiin asennettavaksi käynnistyssäädin Danfoss KVL. Nestelinja päätettiin vaihtaa koosta Cu 10 kokoon Cu 12. Asennukset suoritettiin suunnitelman mukaisesti. Asennusten jälkeen suoritettiin kompressorille ja höyrystimelle vastaavat mittaukset kuin ennen muutoksia. Mittaustulosten pohjalta piirrettiin uusi kylmäprosessi CoolPack-ohjelman log p, h -tilapiirroksen. Nyt kylmälaitoksen jäähdytysteho oli 7,74 kW ja COP oli 2,70.

Jälkitarkastelussa käsiteltiin ensin ilmanvaihtoa. Tilan ilmavirrat laskivat murto-osaan lähtötilanteeseen verrattuna. Energian säästöä ei kuitenkaan voitu tältä osin laskea, koska ilmavirtoja ei lähtötilanteessa mitattu. Ilmavirtojen säädön vaikutusta ei myöskään voitu todeta tulo- ja poistokoneilla niiden suuren koon takia. Tärkeämpänä vaikutuksena todettiin tuloilman mukanaan tuoman kosteuden määrän väheneminen.

Kylmäprosessin COP kasvoi 76,6 %, jäähdytysteho kasvoi 71,9 % ja kompressorin verkosta ottama teho laski 2,7 %. Muutosten kohteena olevan koneikon käyntiaikasuhte laski 30 %, vaikka huonelämpötila muutosalueella laski noin 7 °C. Ilman sekoittuminen tilassa parani myös uuden höyrystimen suuremman ilmavirran ansiosta. Muutostöille laskettiin koroton ja korollinen takaisinmaksuaika. Koroton takaisinmaksuaika muutoksille oli 9,6 vuotta.

Höyrystimen ilman jäähdytysprosessia verrattiin lähtötilanteen ja muutosten jälkeisen tilanteen välillä. Vertailu ei ollut tasa-arvoinen, johtuen lopputilanteen matalammasta lämpötilatasosta huoneessa. Kuivausteho oli kuitenkin selvästi pienentynyt, koska höyrystymislämpötila oli noussut lähes 13 °C.

Kahden muutostöiden kohteena olevan höyrystimen vaikutusalueella sijaitsevan syväjäähdytyskoneen energian kulutus mitattiin ennen muutostöitä ja uudelleen niiden jälkeen. Keskimääräinen energian kulutus alkutilanteessa oli 5 609 kWh vuodessa. Muutosten jälkeen kulutus oli 4 969 kWh vuodessa. Tuloksena oli, että syväjäähdytyskoneiden ympäristön lämpötilan muutos laski niiden energian kulutusta keskimäärin 11,4 %. Takaisinmaksulaskelmassa syväjäähdytyskoneiden osuus kokonaissäästöistä oli runsas kolmasosa. Energian kulutus mitattiin pistorasialiitännäisillä energiamittareilla.

Lopputuloksena oli taloudellisemmin toimiva jäähdytys- ja ilmanvaihtojärjestelmä, jonka ansiosta syväjäähdytyskonehuoneen lämpötila saatiin laskettua alemmaksi. Alemmassa huonelämpötilassa myös syväjäähdytyskoneiden energian kulutus laski huomattavasti.

Lähteet

- 1 Tila- ja kiinteistökeskus. 2016. Verkkodokumentti. Helsingin Yliopisto. <<http://www.helsinki.fi/tekno/>>. Luettu 17.1.2017.
- 2 Labrum Oy –86 °C Pakastimet. 2012. Verkkodokumentti. Labrum Oy. <<http://www.labrum.fi/show.asp?si=1013&go=Laboratoriolaitteet--86%B0C%20Pakastimet>>. Luettu 21.2.2017.
- 3 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2012. Suomen rakentamismääräyskoelma osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 4 Hakala, Pertti & Kaappola, Esko. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus.
- 5 Labrum Oy VIP series. 2012. Verkkodokumentti. Labrum Oy. <[http://www.labrum.fi/admin/filer/Panasonic%20-86°C%20frys-skäp,%20VIP%20serien.pdf](http://www.labrum.fi/admin/filer/Panasonic%20-86%C%20frys-skäp,%20VIP%20serien.pdf)> . Luettu 21.4.2017.
- 6 Chiller kasettipatterit KDC/KDCH. 1999. Verkkodokumentti. Chiller Oy. <http://www.chiller.fi/doc/kasettipatterit/KDC_KDCH.pdf>. Luettu 6.7.2017.
- 7 Elektronika S.A. Products catalog ZR40K3E-TFD. 2016. Verkkodokumentti. Elektronika S.A. <<https://www.elektronika-sa.com.pl/tcmodel.php?line=HCSSC-ZR-2006&model=ZR40K3E-TFD&RID=4&Tab=2&LID=2>> . Luettu 10.7.2017.
- 8 Kianta, Jani. 2013. Kylmätekniiikan käsikirja. Tampere: Suomen kylmäyhdistys ry.
- 9 Efficiency classes for IEC line motors. 2017. Verkkodokumentti. Siemens Oy. <<http://w3.siemens.com/drives/global/en/motor/low-voltage-motor/efficiency-standards/pages/line-motors.aspx>>. Luettu 10.7.2017.
- 10 Rivacold Select refrigerating capacity table (Watt) – Gas: R407 C. 2017. Verkkodokumentti. Rivacold srl. Luettu 10.7.2017.
- 11 Danfoss KVL käynnistysäädin. 2017. Verkkodokumentti. Danfoss Oy. <<http://files.danfoss.com/images/IMG107648830787.jpg?w=1024&h=724&mode=pad>>. Luettu 22.4.2017.

Liite 1. Haartmaninkatu 3, BK205 syväjäähäpakkastimet

Haartmaninkatu 3, Syväjäähäpakkastimet, tila BK205

12.1.2017

nro	merkki	malli	as.arvo, °C	oloarvo, °C	jännite, V	nim. virta, A
1	Revco	ULT-1490-5-V-U-A	-80	-73	230	10,7
2	Thermo Scientific	8708	-80	-82	230	12
3	Sanyo Ultralow	MDF-592	-80	-84	230	5,3
4	Revco	ULT-1790-U-N-M	-80	-71	230	3,8
5	Thermo Scientific	820 CV	-80	-70	230	12
6	Skadi	Skadi DF8524GL	-80	-74	230	7
7	Kendro	QLT 1785V32	-80	-80	230	12
8	Sanyo Ultralow	MDF-592	-80	-69	230	5,3
9	Revco	ULT-1386-9-V12	-80	-78	230	12
10	Skadi	DF9014	-80	-80	230	7
11	Revco	QBF 2585 V35	-80	-72	230	10
12	Kendro	HFU 686 B	-80	-74	230	4
13	Thermo Scientific	8706	-80	-75	230	12
14	Thermo Scientific	ULT 10140-9-M22	-130	-131	230	11
15	Gram	FS 340.01	-22	-20	230	1,2
16	Sanyo Ultralow	MDF-2136	-130	-133	230	10,3
17	New Brunswic Scientific	C54285	-80	-69	230	10
18	Panasonic	MDF-U76V	-80	-81	230	4,4
19	Kendro	QLT 1885 V37	-80	-72	230	10
20	Skadi	Skadi DF9020GL	-80	-80	230	7
21	Revco	ULT 790-3-V31	-80	-71	230	12
22	Kendro	QLT 2085V33	-80	-75	230	10

Liite 2. Haartmaninkatu 3, tarvittavan ilmanvaihdon laskenta

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Talotekniikan koulutusohjelma
Anssi Malinen

Pitoisuus tilassa tietyn ajan jälkeen, kun tilassa on tietty lähtöpitoisuus

- Syväjäähäpakkastintilan tilavuus on 197 m³. Tilassa on 21 kpl syväjäähäpakkastinta. Yhden pakkastimen olosuhteet on turvattu CO₂ hätäjäähdytyksellä. Kyseiseen pakkastimeen johdetaan laitteen häiriötilanteessa CO₂ nestettä, jotta lämpötila saadaan pidettyä alle -50°C (arvio, riippuu säädöstä).
- CO₂ pitoisuus on Agan käyttöturvallisuustiedotteen mukaan 0,5% (HTP: 5000 ppm; 9100 mg/m³ (8 h) (Suomi 2005).) työskentelyalueella.
 - Syväjäähäpakkastimeen syötetään CO₂ nestettä 60 kg pullosta, pullo tyhjenee kahdessa vuorokaudessa (huoltoliikkeen arvio).
 - Pitoisuuden nousuaikana käytetään 48 h, jossa ajassa pullo tyhjenee.
 - Tilan ilma sekoittuu täysin, koska tilassa on ilmanvaihdon lisäksi neljä puhallinlauhduttimella ja neljä puhallinlauhduttimella sekoittavat ilmaa.
 - Tilan alkupitoisuus CO₂ on 450 ppm.

Lähtötiedot:

Tilan tilavuus V	197 m ³
CO ₂ alkupitoisuus	450 ppm
CO ₂ tuotto	1,25 kg/h
CO ₂ tuotto	347,2222 mg/s
Ilmanvaihto	41,78898 l/s
Tarkasteltava aika	48 h

Laskenta:

CO ₂ tiheys	1,98 kg/m ³
CO ₂ moolimassa	44,01 g/mol
Ca on CO	450 ppm
Ca on CO	821,7635 mg/m ³
S	347,2222 mg/s
Q	0,041789 m ³ /s
V	197 m ³

$$\frac{\text{Massapitoisuus}}{\text{mg/m}^3} = \frac{\text{Molekyyli massa / (g/mol)}}{24,1} \cdot x \quad \text{--- Tilavuusosuus / ppm}$$

$$c_{ss} = c_n + \frac{S}{Q}$$


t 172800 s
C_{ss} 9130,705 mg/m³

C_t 9130,705 mg/m³

$$\frac{[c_{ss} - c(t)]}{[c_{ss} - c_0]} = \exp\left(-\frac{Q_t}{V}\right)$$

C_t 5000 ppm
C_t maksimi 5000 ppm

Tilavuusosuus	=	24,1	x	Massapitoisuus
ppm		molekyyli massa/ (g/mol)		mg/m ³

Suoritetaan Excelin tavoitteenhakutoiminto: C_t on C_t maksimi muuttamalla ilmanvaihdon solua.  Paina tätä makroa.

Säädetään tilan ilmanvaihto vastaamaan tarvittavaa laskennallista ilmanvaihtoa.

Liite 3. Haartmaninkatu 3, BK205 ilmanvaihdon mittaus ja säätö

Haartmaninkatu 3, ilmanvaihdon mittaus ja säätö, tila BK205

1.3.2017

Laskennassa käytetty kaava: $q_v = k \times \sqrt{\Delta P_m}$ l/s

Tuloilma:

nro	malli	Δp , Pa	avaus, mm	k-arvo	virtaama l/s
1	Halton URH 125	19	0	2,17	9,5
2	Halton URH 125	19	0	2,17	9,5
3	Halton URH 125	18	0	2,17	9,2
4	Halton URH 125	18	0	2,17	9,2
5	Halton URH 125	24	-3	1,84	9,0
				yhteensä:	46,3

Poistoilma:

nro	malli	Δp , Pa	avaus, mm	k-arvo	virtaama l/s
1	Halton URH 125	87	-11	1,05	9,8
2	Halton URH 125	86	-12	0,92	8,5
3	Halton URH 125	100	-12	0,92	9,2
4	Halton URH 125	120	-12	0,92	10,1
5	Halton URH 125	120	-12	0,92	10,1
				yhteensä:	47,7

Liite 4. Haartmaninkatu 3, mittauspöytäkirja 12.1.2017

Mittauspöytäkirja 12.01.2017

KF01.1 -mittaukset

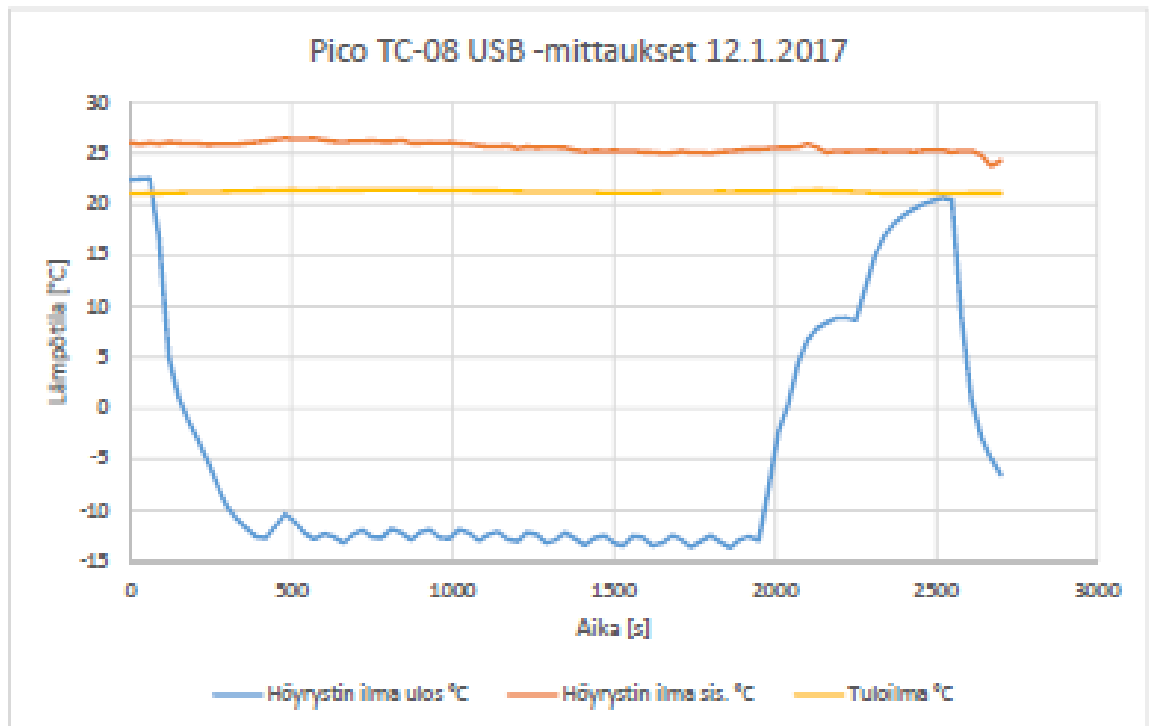
Anssi Malinen

Helsingin Yliopisto

Pico TC-08 USB		Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4
Date	Time	Höyrystin ilma ulos	Höyrystin ilma sis.	Nestelinja ennen PV	Tuloilma
		°C	°C	°C	°C
12.1.2017	12:05:11	22,46	26,05	17,12	21,03
12.1.2017	12:05:41	22,55	25,91	17,51	21,06
12.1.2017	12:06:11	22,62	26,05	17,89	21,09
12.1.2017	12:06:41	16,81	25,93	20,18	21,09
12.1.2017	12:07:11	5,05	26,1	22,78	21,11
12.1.2017	12:07:41	1,06	26,01	25,14	21,14
12.1.2017	12:08:11	-1,24	25,97	28,13	21,19
12.1.2017	12:08:41	-3,14	25,95	30,37	21,2
12.1.2017	12:09:11	-5,3	25,87	32,57	21,22
12.1.2017	12:09:41	-7,61	25,89	35,12	21,22
12.1.2017	12:10:11	-9,56	25,93	37,06	21,25
12.1.2017	12:10:41	-10,79	25,89	37,92	21,26
12.1.2017	12:11:11	-11,77	26,02	38,43	21,27
12.1.2017	12:11:41	-12,62	26,1	38,9	21,3
12.1.2017	12:12:11	-12,72	26,23	38,61	21,33
12.1.2017	12:12:41	-11,5	26,38	38,12	21,33
12.1.2017	12:13:11	-10,29	26,48	37,78	21,35
12.1.2017	12:13:41	-11,06	26,42	37,28	21,37
12.1.2017	12:14:11	-12,24	26,42	36,75	21,33
12.1.2017	12:14:41	-12,84	26,46	36,29	21,35
12.1.2017	12:15:11	-12,35	26,33	35,96	21,38
12.1.2017	12:15:41	-12,62	26,18	35,76	21,35
12.1.2017	12:16:11	-13,22	26,11	35,74	21,37
12.1.2017	12:16:41	-12,43	26,2	35,89	21,39
12.1.2017	12:17:11	-11,96	26,21	35,88	21,39
12.1.2017	12:17:41	-12,66	26,25	35,71	21,4
12.1.2017	12:18:11	-12,69	26,17	35,67	21,41
12.1.2017	12:18:41	-11,84	26,17	35,67	21,43
12.1.2017	12:19:11	-12,23	26,28	35,56	21,41
12.1.2017	12:19:41	-12,9	26,02	35,53	21,41
12.1.2017	12:20:11	-12,2	26,02	35,6	21,39
12.1.2017	12:20:41	-11,94	26,07	35,54	21,38
12.1.2017	12:21:11	-12,71	26,06	35,45	21,33
12.1.2017	12:21:41	-12,78	26,07	35,52	21,35
12.1.2017	12:22:11	-11,89	25,95	35,53	21,34
12.1.2017	12:22:41	-12,25	25,9	35,42	21,33
12.1.2017	12:23:11	-13	25,77	35,37	21,31
12.1.2017	12:23:41	-12,43	25,68	35,45	21,29
12.1.2017	12:24:11	-12,1	25,69	35,44	21,29
12.1.2017	12:24:41	-12,84	25,75	35,36	21,28
12.1.2017	12:25:11	-13,06	25,53	35,42	21,25

12.1.2017	12:25:41	-12,19	25,66	35,46	21,22
12.1.2017	12:26:11	-12,4	25,57	35,36	21,22
12.1.2017	12:26:41	-13,23	25,62	35,29	21,2
12.1.2017	12:27:11	-12,93	25,59	35,36	21,22
12.1.2017	12:27:41	-12,23	25,58	35,37	21,21
12.1.2017	12:28:11	-12,8	25,34	35,3	21,21
12.1.2017	12:28:41	-13,44	25,22	35,27	21,19
12.1.2017	12:29:11	-12,73	25,3	35,38	21,17
12.1.2017	12:29:41	-12,5	25,24	35,43	21,13
12.1.2017	12:30:11	-13,24	25,3	35,33	21,16
12.1.2017	12:30:41	-13,46	25,26	35,29	21,16
12.1.2017	12:31:11	-12,54	25,28	35,36	21,15
12.1.2017	12:31:41	-12,66	25,15	35,33	21,11
12.1.2017	12:32:11	-13,46	25,14	35,23	21,16
12.1.2017	12:32:41	-13,22	25,03	35,28	21,17
12.1.2017	12:33:11	-12,45	25,07	35,25	21,17
12.1.2017	12:33:41	-12,89	25,26	35,13	21,17
12.1.2017	12:34:11	-13,61	25,11	35,02	21,17
12.1.2017	12:34:41	-13,05	25,09	35,05	21,21
12.1.2017	12:35:11	-12,5	25,03	35,04	21,22
12.1.2017	12:35:41	-13,12	25,19	34,94	21,23
12.1.2017	12:36:11	-13,68	25,24	34,95	21,21
12.1.2017	12:36:41	-12,87	25,35	35,01	21,24
12.1.2017	12:37:11	-12,57	25,44	34,88	21,24
12.1.2017	12:37:41	-12,96	25,43	34,21	21,24
12.1.2017	12:38:11	-7,82	25,51	28,94	21,25
12.1.2017	12:38:41	-2,31	25,57	26,68	21,26
12.1.2017	12:39:11	0,37	25,58	25,74	21,28
12.1.2017	12:39:41	4,48	25,63	25,33	21,32
12.1.2017	12:40:11	6,7	25,94	25,2	21,33
12.1.2017	12:40:41	7,76	25,62	25,2	21,37
12.1.2017	12:41:11	8,38	25,13	25,21	21,36
12.1.2017	12:41:41	8,84	25,28	25,19	21,3
12.1.2017	12:42:11	8,89	25,22	25,15	21,28
12.1.2017	12:42:41	8,6	25,24	25,13	21,22
12.1.2017	12:43:11	11,84	25,27	25,12	21,19
12.1.2017	12:43:41	15,05	25,3	25,13	21,13
12.1.2017	12:44:11	16,96	25,22	25,14	21,1
12.1.2017	12:44:41	18,14	25,28	25,14	21,09
12.1.2017	12:45:11	18,94	25,28	25,11	21,09
12.1.2017	12:45:41	19,58	25,19	24,64	21,08
12.1.2017	12:46:11	20,05	25,32	23,88	21,07
12.1.2017	12:46:41	20,37	25,3	23,15	21,08
12.1.2017	12:47:11	20,64	25,33	22,66	21,07
12.1.2017	12:47:41	20,47	25,16	22,8	21,07
12.1.2017	12:48:11	8,71	25,28	25,46	21,07
12.1.2017	12:48:41	0,8	25,28	26,89	21,08
12.1.2017	12:49:11	-2,8	24,87	28,48	21,09
12.1.2017	12:49:41	-4,95	23,78	29,89	21,08
12.1.2017	12:50:11	-6,54	24,33	30,76	21,08

Mittauspöytäkirja 12.1.2017
Höyrystin KF01.1 -mittaukset, graafinen kuvaaja
Anssi Malinen
Helsingin Yliopisto



Mittauspöytäkirja 12.01.2017

JK 1.1 -mittaukset

Anssi Malinen

Helsingin Yliopisto

Testo 570									
Date / time	SecRuntime	bar po	°C to	bar pc	°C tc	°C toh	K Δtoh	°C tcu	K Δt
		bar(g)	°C (D)	bar(g)	°C (B)	°C	K	°C	K
12.1.2017 12.05.10	0	6,14	13,2	13,69	33,0	31,1	17,9	38,3	7,2
12.1.2017 12.05.40	30	6,16	13,2	13,68	33,0	31,3	18,1	38,2	6,9
12.1.2017 12.06.10	60	6,18	13,3	13,66	32,9	31,4	18,1	38,1	6,7
12.1.2017 12.06.40	90	6,19	13,4	13,65	32,9	31,5	18,1	38,1	6,6
12.1.2017 12.07.10	120	4,19	3,4	16,04	38,9	31,4	28,0	46,0	14,6
12.1.2017 12.07.40	150	3,95	2,0	19,60	46,8	29,6	27,6	80,3	50,7
12.1.2017 12.08.10	180	3,73	0,7	20,94	49,5	27,9	27,2	92,6	64,7
12.1.2017 12.08.40	210	3,42	-1,2	21,32	50,3	25,4	26,6	98,5	73,1
12.1.2017 12.09.10	240	3,09	-3,4	21,29	50,2	16,5	19,9	96,8	80,3
12.1.2017 12.09.40	270	2,68	-6,3	20,76	49,1	11,6	17,9	95,5	83,9
12.1.2017 12.10.10	300	2,32	-9,1	20,29	48,2	7,8	16,9	96,4	88,6
12.1.2017 12.10.40	330	2,05	-11,3	19,85	47,3	5,8	17,1	99,8	94,0
12.1.2017 12.11.10	360	1,86	-13,0	19,31	46,2	4,7	17,7	102,9	98,2
12.1.2017 12.11.40	390	1,69	-14,5	18,68	44,8	4,1	18,6	105,6	101,5
12.1.2017 12.12.10	420	1,57	-15,7	18,07	43,5	3,9	19,6	107,9	104,0
12.1.2017 12.12.40	450	1,68	-14,6	17,59	42,5	3,9	18,5	109,3	105,4
12.1.2017 12.13.10	480	2,06	-11,2	18,01	43,4	4,1	15,3	109,0	104,9
12.1.2017 12.13.40	510	2,16	-10,4	18,74	45,0	4,4	14,8	107,3	102,9
12.1.2017 12.14.10	540	1,90	-12,6	18,45	44,3	4,8	17,4	108,2	103,4
12.1.2017 12.14.40	570	1,69	-14,5	18,05	43,5	5,3	19,8	110,0	104,7
12.1.2017 12.15.10	600	1,75	-14,0	17,87	43,1	5,9	19,9	112,0	106,1
12.1.2017 12.15.40	630	1,91	-12,5	18,10	43,6	6,4	18,9	112,4	106,0
12.1.2017 12.16.10	660	1,68	-14,6	17,94	43,2	7,1	21,7	113,1	106,0
12.1.2017 12.16.40	690	1,67	-14,7	17,73	42,8	7,7	22,4	115,0	107,3
12.1.2017 12.17.10	720	1,97	-12,0	18,01	43,4	8,3	20,3	115,6	107,3
12.1.2017 12.17.40	750	1,83	-13,2	18,11	43,6	8,9	22,1	115,1	106,2
12.1.2017 12.18.10	780	1,63	-15,1	17,74	42,8	9,4	24,5	116,5	107,1
12.1.2017 12.18.40	810	1,85	-13,0	17,76	42,8	9,9	22,9	117,4	107,5
12.1.2017 12.19.10	840	1,97	-12,0	18,10	43,6	10,3	22,3	116,7	106,4
12.1.2017 12.19.40	870	1,71	-14,3	17,82	43,0	10,6	24,9	117,1	106,5
12.1.2017 12.20.10	900	1,71	-14,3	17,58	42,4	10,9	25,2	118,7	107,8
12.1.2017 12.20.40	930	2,01	-11,6	17,86	43,1	11,2	22,8	118,6	107,4
12.1.2017 12.21.10	960	1,84	-13,1	17,99	43,3	11,4	24,5	117,9	106,5
12.1.2017 12.21.40	990	1,62	-15,2	17,65	42,6	11,6	26,8	119,0	107,4
12.1.2017 12.22.10	1020	1,84	-13,1	17,70	42,7	11,8	24,9	120,0	108,2
12.1.2017 12.22.40	1050	1,98	-11,9	18,06	43,5	12,0	23,9	119,1	107,1
12.1.2017 12.23.10	1080	1,73	-14,1	17,82	43,0	12,1	26,2	119,3	107,2
12.1.2017 12.23.40	1110	1,69	-14,5	17,51	42,3	12,3	26,8	120,7	108,4
12.1.2017 12.24.10	1140	1,97	-12,0	17,78	42,9	12,5	24,5	120,6	108,1
12.1.2017 12.24.40	1170	1,83	-13,2	17,92	43,2	12,6	25,8	119,6	107,0
12.1.2017 12.25.10	1200	1,61	-15,3	17,60	42,5	12,6	27,9	120,8	108,2

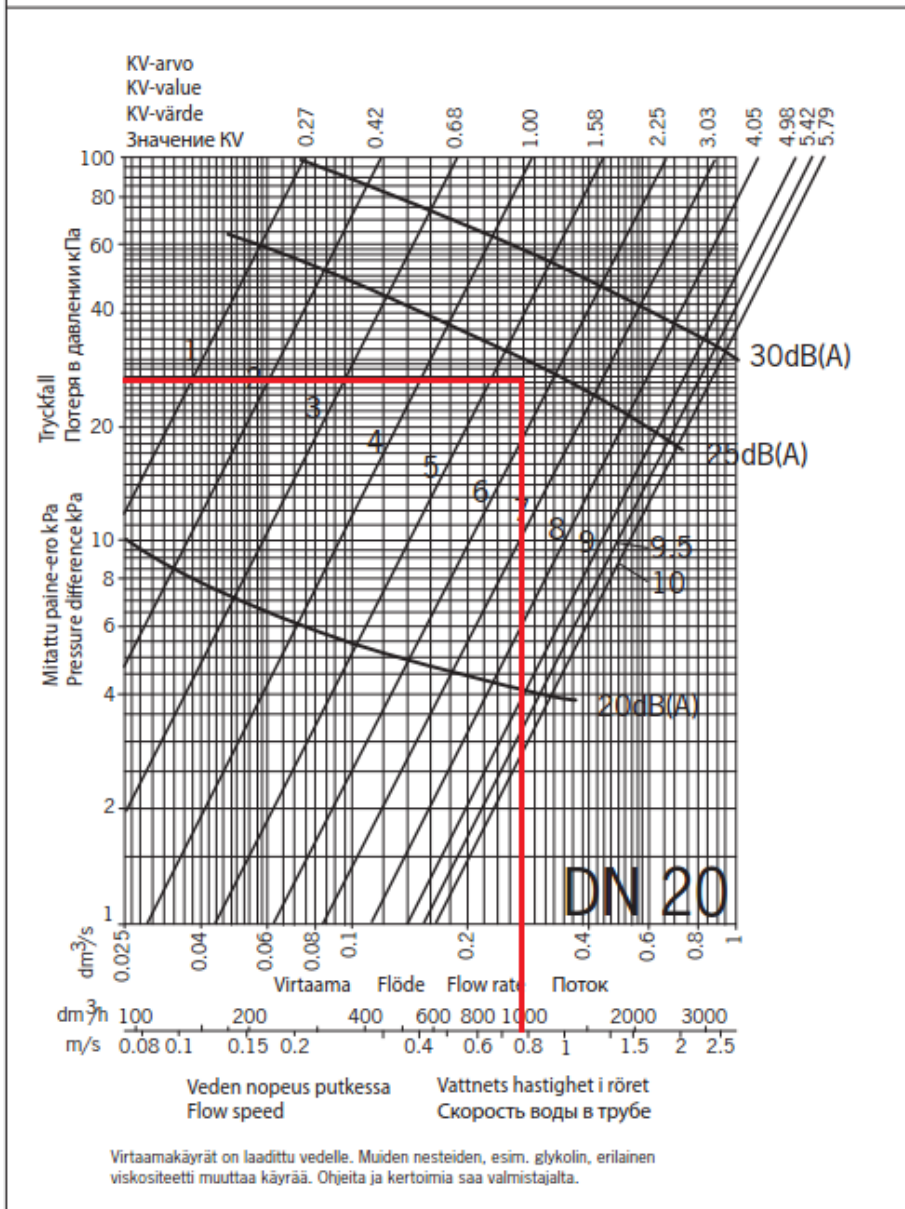
12.1.2017 12.25.40	1230	1,79	-13,6	17,66	42,6	12,7	26,3	121,8	109,1
12.1.2017 12.26.10	1260	1,98	-11,9	18,13	43,6	12,8	24,7	121,2	108,4
12.1.2017 12.26.40	1290	1,73	-14,1	18,02	43,4	12,8	26,9	121,3	108,5
12.1.2017 12.27.10	1320	1,62	-15,2	17,69	42,7	12,9	28,1	122,8	109,9
12.1.2017 12.27.40	1350	1,87	-12,9	17,87	43,1	12,9	25,8	123,3	110,4
12.1.2017 12.28.10	1380	1,89	-12,7	18,16	43,7	13,0	25,7	122,2	109,2
12.1.2017 12.28.40	1410	1,64	-15,0	17,85	43,0	13,0	28,0	122,7	109,7
12.1.2017 12.29.10	1440	1,67	-14,7	17,60	42,5	13,0	27,7	123,9	110,9
12.1.2017 12.29.40	1470	1,95	-12,2	17,93	43,2	13,0	25,2	123,6	110,6
12.1.2017 12.30.10	1500	1,78	-13,7	18,00	43,4	13,0	26,7	122,8	109,8
12.1.2017 12.30.40	1530	1,56	-15,8	17,60	42,5	13,0	28,8	123,8	110,8
12.1.2017 12.31.10	1560	1,74	-14,1	17,54	42,3	13,0	27,1	124,7	111,7
12.1.2017 12.31.40	1590	1,95	-12,2	17,88	43,1	13,0	25,2	123,6	110,6
12.1.2017 12.32.10	1620	1,70	-14,4	17,78	42,9	13,0	27,4	123,1	110,1
12.1.2017 12.32.40	1650	1,57	-15,7	17,45	42,1	13,0	28,7	124,4	111,4
12.1.2017 12.33.10	1680	1,83	-13,2	17,63	42,5	13,0	26,2	124,9	111,9
12.1.2017 12.33.40	1710	1,90	-12,6	17,98	43,3	13,0	25,6	123,6	110,6
12.1.2017 12.34.10	1740	1,63	-15,1	17,67	42,6	13,0	28,1	123,8	110,8
12.1.2017 12.34.40	1770	1,60	-15,4	17,29	41,8	12,9	28,3	125,0	112,1
12.1.2017 12.35.10	1800	1,89	-12,7	17,50	42,2	12,9	25,6	124,8	111,9
12.1.2017 12.35.40	1830	1,83	-13,2	17,73	42,8	12,9	26,1	123,3	110,4
12.1.2017 12.36.10	1860	1,58	-15,6	17,39	42,0	12,9	28,5	123,9	111,0
12.1.2017 12.36.40	1890	1,65	-14,9	17,16	41,5	12,9	27,8	125,0	112,1
12.1.2017 12.37.10	1920	1,94	-12,3	17,47	42,2	12,9	25,2	124,3	111,4
12.1.2017 12.37.40	1950	1,78	-13,7	17,58	42,4	12,9	26,6	123,0	110,1
12.1.2017 12.38.10	1980	1,55	-15,9	17,18	41,5	12,8	28,7	123,8	111,0
12.1.2017 12.38.40	2010	2,50	-7,7	15,12	36,6	13,2	20,9	120,4	107,2
12.1.2017 12.39.10	2040	2,95	-4,4	14,68	35,5	13,7	18,1	111,4	97,7
12.1.2017 12.39.40	2070	3,24	-2,4	14,68	35,5	14,2	16,6	102,7	88,5
12.1.2017 12.40.10	2100	3,47	-0,9	14,59	35,3	14,7	15,6	95,5	80,8
12.1.2017 12.40.40	2130	3,63	0,1	14,49	35,0	15,1	15,0	89,6	74,5
12.1.2017 12.41.10	2160	3,74	0,8	14,49	35,0	15,6	14,8	84,8	69,2
12.1.2017 12.41.40	2190	3,82	1,2	14,46	35,0	16,0	14,8	80,4	64,4
12.1.2017 12.42.10	2220	3,89	1,7	14,44	34,9	16,5	14,8	76,2	59,7
12.1.2017 12.42.40	2250	3,96	2,1	14,39	34,8	16,9	14,8	72,6	55,7
12.1.2017 12.43.10	2280	4,01	2,4	14,33	34,6	17,4	15,0	69,4	52,0
12.1.2017 12.43.40	2310	4,07	2,7	14,28	34,5	17,9	15,2	66,4	48,5
12.1.2017 12.44.10	2340	4,12	3,0	14,25	34,4	18,3	15,3	63,9	45,6
12.1.2017 12.44.40	2370	4,17	3,3	14,22	34,3	18,7	15,4	61,6	42,9
12.1.2017 12.45.10	2400	4,22	3,6	14,19	34,3	19,2	15,6	59,5	40,3
12.1.2017 12.45.40	2430	4,26	3,8	14,18	34,2	19,6	15,8	57,7	38,1
12.1.2017 12.46.10	2460	4,33	4,2	14,17	34,2	20,0	15,8	56,1	36,1
12.1.2017 12.46.40	2490	4,38	4,5	14,15	34,2	20,5	16,0	54,7	34,2
12.1.2017 12.47.10	2520	4,42	4,7	14,13	34,1	20,9	16,2	53,3	32,4
12.1.2017 12.47.40	2550	4,44	4,8	14,13	34,1	21,3	16,5	52,2	30,9
12.1.2017 12.48.10	2580	4,47	5,0	14,12	34,1	21,8	16,8	51,1	29,3
12.1.2017 12.48.40	2610	3,58	-0,2	17,85	43,0	21,7	21,9	77,2	55,5
12.1.2017 12.49.10	2640	3,37	-1,6	19,95	47,5	21,0	22,6	94,8	73,8
12.1.2017 12.49.40	2670	3,00	-4,0	20,00	47,6	20,5	24,5	102,8	82,3
12.1.2017 12.50.10	2700	2,67	-6,4	19,47	46,5	19,9	26,3	107,0	87,1

Liite 5. JK 1.1 Lauhduttimen toisiovirtaama

Venttiilit/Säätökäyrät



Linjasäätöventtiili / 410020
Pumpunsäätöventtiili / 411018 / 411022
LVK-linjasäätöventtiili / 412018 / 412022



Liite 6. Haartmaninkatu 3, mittauspöytäkirja 5.4.2017

Mittauspöytäkirja 5.4.2017

KF01.1 -mittaukset

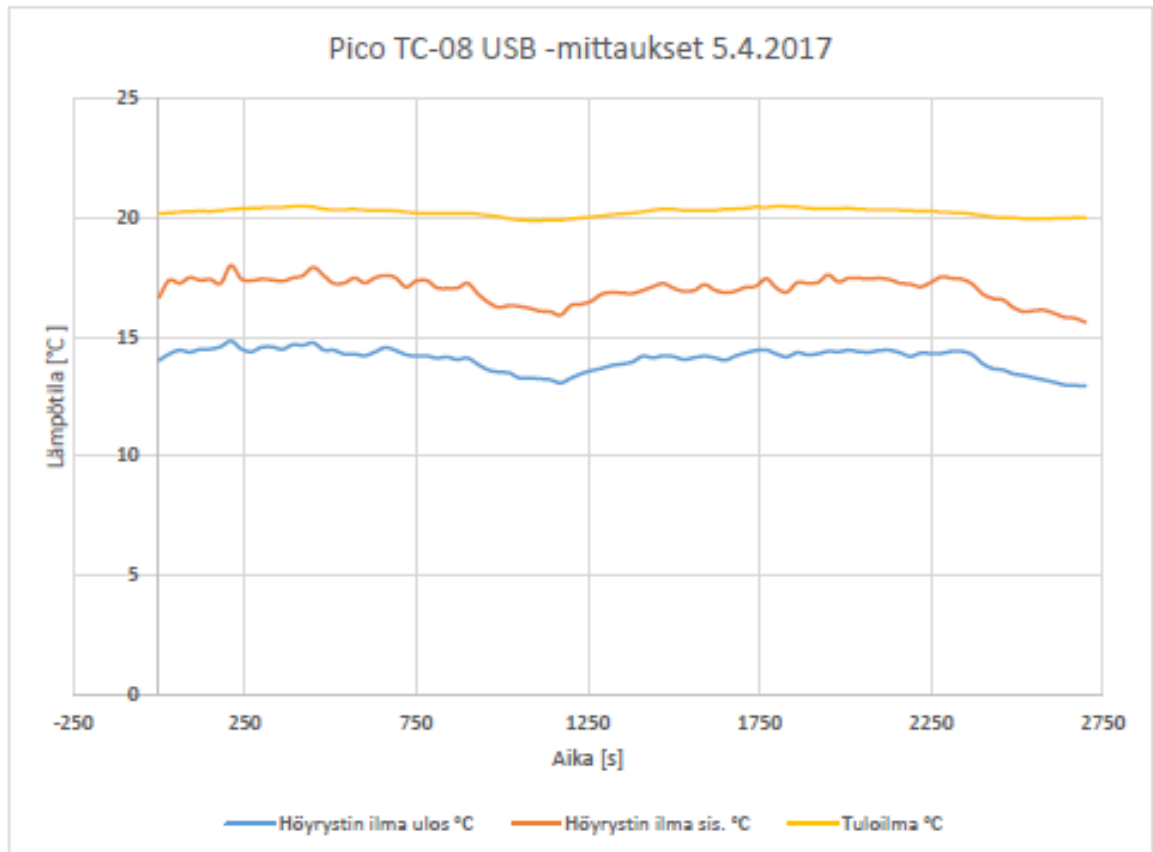
Anssi Malinen

Helsingin Yliopisto

Pico TC-08 USB		Channel 1	Channel 2	Channel 3	Channel 4	Channel 5
Date	Time	Höyrystin ilma ulos	Höyrystin ilma sis.	Nestel. ennen PV	Tuloilma	Imulinja
		°C	°C	°C	°C	°C
5.4.2017	14:36:22	14,02	16,66	34,3	20,2	13,63
5.4.2017	14:36:52	14,29	17,39	34,25	20,21	13,89
5.4.2017	14:37:22	14,45	17,26	34,15	20,25	14,07
5.4.2017	14:37:52	14,37	17,5	34,02	20,27	13,73
5.4.2017	14:38:22	14,49	17,39	33,78	20,29	13,27
5.4.2017	14:38:52	14,5	17,42	33,63	20,28	13,02
5.4.2017	14:39:22	14,6	17,25	33,58	20,32	13,01
5.4.2017	14:39:52	14,83	18,01	33,62	20,36	13,27
5.4.2017	14:40:22	14,5	17,43	33,57	20,39	13,25
5.4.2017	14:40:52	14,39	17,37	33,46	20,41	12,79
5.4.2017	14:41:22	14,58	17,44	33,36	20,43	12,31
5.4.2017	14:41:52	14,59	17,4	33,32	20,44	12,79
5.4.2017	14:42:22	14,49	17,35	33,31	20,45	13,3
5.4.2017	14:42:52	14,68	17,48	33,36	20,48	13,8
5.4.2017	14:43:22	14,66	17,58	33,54	20,49	14,21
5.4.2017	14:43:52	14,76	17,93	33,59	20,46	14,06
5.4.2017	14:44:22	14,46	17,58	33,63	20,38	13,53
5.4.2017	14:44:52	14,45	17,25	33,72	20,34	12,97
5.4.2017	14:45:22	14,29	17,27	33,84	20,35	12,55
5.4.2017	14:45:52	14,29	17,48	33,93	20,36	12,56
5.4.2017	14:46:22	14,22	17,28	33,96	20,33	12,99
5.4.2017	14:46:52	14,38	17,49	34,01	20,32	13,42
5.4.2017	14:47:22	14,56	17,59	34,07	20,31	13,81
5.4.2017	14:47:52	14,44	17,49	34,08	20,3	14
5.4.2017	14:48:22	14,26	17,1	34,08	20,25	13,64
5.4.2017	14:48:52	14,2	17,36	34,03	20,21	13,05
5.4.2017	14:49:22	14,21	17,38	34,09	20,19	12,66
5.4.2017	14:49:52	14,12	17,07	34,22	20,19	12,47
5.4.2017	14:50:22	14,16	17,04	34,34	20,18	12,56
5.4.2017	14:50:52	14,06	17,06	34,41	20,19	13
5.4.2017	14:51:22	14,12	17,26	34,45	20,2	13,31
5.4.2017	14:51:52	13,85	16,81	34,51	20,16	13,27
5.4.2017	14:52:22	13,62	16,46	34,48	20,11	12,89
5.4.2017	14:52:52	13,53	16,25	34,41	20,05	12,54
5.4.2017	14:53:22	13,5	16,32	34,38	19,97	12,36
5.4.2017	14:53:52	13,29	16,29	34,35	19,92	12,22
5.4.2017	14:54:22	13,29	16,21	34,33	19,9	11,9
5.4.2017	14:54:52	13,25	16,09	34,18	19,9	12
5.4.2017	14:55:22	13,21	16,07	34,16	19,92	12,38
5.4.2017	14:55:52	13,08	15,92	34,1	19,92	12,47
5.4.2017	14:56:22	13,27	16,32	34,18	19,96	12,67

5.4.2017	14:56:52	13,46	16,38	34,22	20	12,98
5.4.2017	14:57:22	13,59	16,51	34,2	20,04	13,18
5.4.2017	14:57:52	13,69	16,8	34,15	20,08	13,38
5.4.2017	14:58:22	13,81	16,87	34,16	20,14	13,45
5.4.2017	14:58:52	13,87	16,85	34,2	20,17	13,3
5.4.2017	14:59:22	13,96	16,83	34,27	20,21	13,24
5.4.2017	14:59:52	14,2	16,96	34,36	20,26	13,48
5.4.2017	15:00:22	14,13	17,12	34,38	20,33	13,54
5.4.2017	15:00:52	14,22	17,25	34,44	20,37	13,63
5.4.2017	15:01:22	14,18	17,05	34,49	20,36	13,73
5.4.2017	15:01:52	14,06	16,92	34,56	20,32	13,53
5.4.2017	15:02:22	14,14	16,96	34,59	20,32	13,3
5.4.2017	15:02:52	14,2	17,2	34,54	20,33	13,08
5.4.2017	15:03:22	14,13	16,97	34,51	20,32	12,99
5.4.2017	15:03:52	14,03	16,87	34,52	20,37	12,81
5.4.2017	15:04:22	14,21	16,93	34,59	20,38	12,88
5.4.2017	15:04:52	14,34	17,09	34,68	20,41	13,22
5.4.2017	15:05:22	14,44	17,14	34,77	20,46	13,59
5.4.2017	15:05:52	14,46	17,45	34,77	20,45	13,73
5.4.2017	15:06:22	14,29	17,05	34,81	20,49	13,42
5.4.2017	15:06:52	14,17	16,89	34,72	20,48	12,87
5.4.2017	15:07:22	14,35	17,29	34,77	20,46	12,65
5.4.2017	15:07:52	14,26	17,26	34,79	20,42	12,64
5.4.2017	15:08:22	14,3	17,29	34,88	20,39	13,04
5.4.2017	15:08:52	14,4	17,61	35,11	20,4	13,46
5.4.2017	15:09:22	14,39	17,32	35,15	20,4	13,75
5.4.2017	15:09:52	14,45	17,48	34,94	20,41	14
5.4.2017	15:10:22	14,39	17,47	34,63	20,37	13,7
5.4.2017	15:10:52	14,37	17,45	34,5	20,35	13,42
5.4.2017	15:11:22	14,44	17,47	34,49	20,34	13,24
5.4.2017	15:11:52	14,45	17,41	34,54	20,35	13,27
5.4.2017	15:12:22	14,34	17,26	34,35	20,33	13,34
5.4.2017	15:12:52	14,19	17,22	34,14	20,31	13,34
5.4.2017	15:13:22	14,33	17,11	34,03	20,29	13,39
5.4.2017	15:13:52	14,31	17,3	34	20,29	13,44
5.4.2017	15:14:22	14,32	17,53	33,85	20,24	13,5
5.4.2017	15:14:52	14,4	17,47	33,76	20,23	13,63
5.4.2017	15:15:22	14,4	17,43	33,6	20,22	13,79
5.4.2017	15:15:52	14,26	17,23	33,38	20,16	13,67
5.4.2017	15:16:22	13,89	16,81	33,18	20,1	13
5.4.2017	15:16:52	13,68	16,62	33,01	20,04	11,96
5.4.2017	15:17:22	13,62	16,56	32,87	20,01	11,51
5.4.2017	15:17:52	13,46	16,24	32,85	20,01	12,5
5.4.2017	15:18:22	13,39	16,07	32,94	19,97	12,94
5.4.2017	15:18:52	13,29	16,11	33	19,96	12,93
5.4.2017	15:19:22	13,2	16,13	32,88	19,97	12,64
5.4.2017	15:19:52	13,1	15,99	32,81	19,98	12,27
5.4.2017	15:20:22	12,99	15,83	32,82	19,99	11,75
5.4.2017	15:20:52	12,97	15,79	32,86	20,01	11,25
5.4.2017	15:21:22	12,95	15,62	32,92	20,01	11,63

Mittauspöytäkirja 5.4.2017
Höyrystin KF01.1 -mittaukset, graafinen kuvaaja
Anssi Malinen
Helsingin Yliopisto



Mittauspöytäkirja 5.4.2017

JK 1.1 -mittaukset

Anssi Malinen

Helsingin Yliopisto

Testo 570									
Date / time	SecRuntime	bar po	°C to	bar pc	°C tc	°C toh	K Δtoh	°C tcu	K Δt
		bar(g)	°C (D)	bar(g)	°C (B)	°C	K	°C	K
5.4.2017 14.36.20	0	3,62	0,1	15,95	38,7	14,6	14,5	84,9	70,3
5.4.2017 14.36.50	30	3,68	0,5	15,95	38,7	14,6	14,1	84,7	70,1
5.4.2017 14.37.20	60	3,72	0,7	15,98	38,8	14,6	13,9	84,3	69,7
5.4.2017 14.37.50	90	3,73	0,8	15,93	38,6	14,6	13,8	84,0	69,4
5.4.2017 14.38.20	120	3,73	0,8	15,90	38,6	14,7	13,9	83,9	69,2
5.4.2017 14.38.50	150	3,74	0,9	15,91	38,6	14,8	13,9	83,8	69,0
5.4.2017 14.39.20	180	3,75	0,9	15,92	38,6	15,0	14,1	83,8	68,8
5.4.2017 14.39.50	210	3,74	0,9	15,95	38,7	15,1	14,2	83,9	68,8
5.4.2017 14.40.20	240	3,74	0,9	15,98	38,8	15,1	14,2	84,1	69,0
5.4.2017 14.40.50	270	3,73	0,8	16,04	38,9	15,2	14,4	84,2	69,0
5.4.2017 14.41.20	300	3,67	0,4	16,06	38,9	15,2	14,8	84,5	69,3
5.4.2017 14.41.50	330	3,65	0,3	16,13	39,1	15,1	14,8	85,0	69,9
5.4.2017 14.42.20	360	3,69	0,5	16,21	39,3	15,1	14,6	85,2	70,1
5.4.2017 14.42.50	390	3,71	0,7	16,26	39,4	15,1	14,4	85,3	70,2
5.4.2017 14.43.20	420	3,76	1,0	16,34	39,6	15,1	14,1	85,2	70,1
5.4.2017 14.43.50	450	3,76	1,0	16,37	39,7	15,0	14,0	85,2	70,2
5.4.2017 14.44.20	480	3,78	1,1	16,39	39,7	15,0	13,9	85,2	70,2
5.4.2017 14.44.50	510	3,78	1,1	16,44	39,8	15,1	14,0	85,2	70,1
5.4.2017 14.45.20	540	3,75	0,9	16,41	39,8	15,2	14,3	85,4	70,2
5.4.2017 14.45.50	570	3,71	0,7	16,38	39,7	15,3	14,6	85,8	70,5
5.4.2017 14.46.20	600	3,70	0,6	16,40	39,8	15,4	14,8	85,9	70,5
5.4.2017 14.46.50	630	3,71	0,7	16,47	39,9	15,4	14,7	86,2	70,8
5.4.2017 14.47.20	660	3,72	0,7	16,60	40,2	15,4	14,7	86,4	71,0
5.4.2017 14.47.50	690	3,73	0,8	16,69	40,4	15,3	14,5	86,7	71,4
5.4.2017 14.48.20	720	3,75	0,9	16,72	40,5	15,2	14,3	86,8	71,6
5.4.2017 14.48.50	750	3,76	1,0	16,73	40,5	15,2	14,2	86,7	71,5
5.4.2017 14.49.20	780	3,75	0,9	16,78	40,6	15,2	14,3	86,9	71,7
5.4.2017 14.49.50	810	3,72	0,7	16,74	40,5	15,2	14,5	87,1	71,9
5.4.2017 14.50.20	840	3,69	0,5	16,76	40,6	15,3	14,8	87,3	72,0
5.4.2017 14.50.50	870	3,69	0,5	16,78	40,6	15,3	14,8	87,5	72,2
5.4.2017 14.51.20	900	3,68	0,5	16,74	40,5	15,3	14,8	87,7	72,4
5.4.2017 14.51.50	930	3,66	0,4	16,71	40,5	15,3	14,9	87,7	72,4
5.4.2017 14.52.20	960	3,67	0,4	16,64	40,3	15,2	14,8	87,6	72,4
5.4.2017 14.52.50	990	3,66	0,4	16,59	40,2	15,2	14,8	87,5	72,3
5.4.2017 14.53.20	1020	3,65	0,3	16,59	40,2	15,1	14,8	87,6	72,5
5.4.2017 14.53.50	1050	3,64	0,2	16,64	40,3	15,2	15,0	87,7	72,5
5.4.2017 14.54.20	1080	3,58	-0,1	16,59	40,2	15,2	15,3	88,0	72,8
5.4.2017 14.54.50	1110	3,56	-0,3	16,52	40,0	15,2	15,5	88,2	73,0
5.4.2017 14.55.20	1140	3,54	-0,4	16,46	39,9	15,2	15,6	88,2	73,0
5.4.2017 14.55.50	1170	3,55	-0,3	16,46	39,9	15,1	15,4	88,2	73,1
5.4.2017 14.56.20	1200	3,54	-0,4	16,48	39,9	15,1	15,5	88,2	73,1

5.4.2017 14.56.50	1230	3,55	-0,3	16,54	40,1	15,0	15,3	88,4	73,4
5.4.2017 14.57.20	1260	3,56	-0,3	16,53	40,1	14,9	15,2	88,4	73,5
5.4.2017 14.57.50	1290	3,60	0,0	16,53	40,1	14,9	14,9	88,3	73,4
5.4.2017 14.58.20	1320	3,63	0,2	16,58	40,2	14,9	14,7	88,1	73,2
5.4.2017 14.58.50	1350	3,65	0,3	16,61	40,2	14,9	14,6	88,0	73,1
5.4.2017 14.59.20	1380	3,66	0,4	16,66	40,4	15,0	14,6	88,0	73,0
5.4.2017 14.59.50	1410	3,66	0,4	16,66	40,4	15,0	14,6	88,1	73,1
5.4.2017 15.00.20	1440	3,67	0,4	16,64	40,3	15,1	14,7	88,1	73,0
5.4.2017 15.00.50	1470	3,66	0,4	16,60	40,2	15,2	14,8	88,0	72,8
5.4.2017 15.01.20	1500	3,68	0,5	16,62	40,3	15,3	14,8	87,9	72,6
5.4.2017 15.01.50	1530	3,70	0,6	16,67	40,4	15,3	14,7	88,0	72,7
5.4.2017 15.02.20	1560	3,70	0,6	16,74	40,5	15,4	14,8	88,0	72,6
5.4.2017 15.02.50	1590	3,72	0,7	16,78	40,6	15,4	14,7	88,1	72,7
5.4.2017 15.03.20	1620	3,72	0,7	16,79	40,7	15,5	14,8	88,1	72,6
5.4.2017 15.03.50	1650	3,73	0,8	16,76	40,6	15,5	14,7	88,1	72,6
5.4.2017 15.04.20	1680	3,72	0,7	16,75	40,6	15,5	14,8	88,0	72,5
5.4.2017 15.04.50	1710	3,73	0,8	16,79	40,7	15,5	14,7	88,0	72,5
5.4.2017 15.05.20	1740	3,73	0,8	16,92	41,0	15,4	14,6	88,2	72,8
5.4.2017 15.05.50	1770	3,74	0,9	17,02	41,2	15,3	14,4	88,4	73,1
5.4.2017 15.06.20	1800	3,74	0,9	17,08	41,3	15,2	14,3	88,6	73,4
5.4.2017 15.06.50	1830	3,76	1,0	17,02	41,2	15,2	14,2	88,5	73,3
5.4.2017 15.07.20	1860	3,74	0,9	16,84	40,8	15,2	14,3	88,3	73,1
5.4.2017 15.07.50	1890	3,72	0,7	16,71	40,5	15,2	14,5	88,1	72,9
5.4.2017 15.08.20	1920	3,71	0,7	16,64	40,3	15,2	14,5	87,9	72,7
5.4.2017 15.08.50	1950	3,69	0,5	16,63	40,3	15,2	14,7	87,9	72,7
5.4.2017 15.09.20	1980	3,70	0,6	16,60	40,2	15,1	14,5	87,9	72,8
5.4.2017 15.09.50	2010	3,73	0,8	16,54	40,1	15,1	14,3	87,6	72,5
5.4.2017 15.10.20	2040	3,74	0,9	16,42	39,8	15,1	14,2	87,1	72,0
5.4.2017 15.10.50	2070	3,73	0,8	16,32	39,6	15,1	14,3	86,7	71,6
5.4.2017 15.11.20	2100	3,73	0,8	16,29	39,5	15,1	14,3	86,5	71,4
5.4.2017 15.11.50	2130	3,72	0,7	16,23	39,4	15,2	14,5	86,5	71,3
5.4.2017 15.12.20	2160	3,71	0,7	16,17	39,2	15,3	14,6	86,4	71,1
5.4.2017 15.12.50	2190	3,70	0,6	16,08	39,0	15,4	14,8	86,3	70,9
5.4.2017 15.13.20	2220	3,69	0,5	15,99	38,8	15,4	14,9	86,1	70,7
5.4.2017 15.13.50	2250	3,68	0,5	15,89	38,5	15,4	14,9	86,0	70,6
5.4.2017 15.14.20	2280	3,67	0,4	15,84	38,4	15,4	15,0	85,7	70,3
5.4.2017 15.14.50	2310	3,67	0,4	15,79	38,3	15,4	15,0	85,6	70,2
5.4.2017 15.15.20	2340	3,68	0,5	15,84	38,4	15,5	15,0	85,5	70,0
5.4.2017 15.15.50	2370	3,69	0,5	15,89	38,5	15,5	15,0	85,6	70,1
5.4.2017 15.16.20	2400	3,70	0,6	15,87	38,5	15,5	14,9	85,5	70,0
5.4.2017 15.16.50	2430	3,60	0,0	15,80	38,3	15,6	15,6	85,7	70,1
5.4.2017 15.17.20	2460	3,53	-0,4	15,77	38,3	15,6	16,0	86,1	70,5
5.4.2017 15.17.50	2490	3,51	-0,6	15,81	38,3	15,7	16,3	86,6	70,9
5.4.2017 15.18.20	2520	3,53	-0,4	15,90	38,6	15,7	16,1	86,9	71,2
5.4.2017 15.18.50	2550	3,54	-0,4	15,97	38,7	15,6	16,0	87,1	71,5
5.4.2017 15.19.20	2580	3,56	-0,3	16,05	38,9	15,5	15,8	87,1	71,6
5.4.2017 15.19.50	2610	3,57	-0,2	16,16	39,2	15,4	15,6	87,3	71,9
5.4.2017 15.20.20	2640	3,55	-0,3	16,25	39,4	15,3	15,6	87,5	72,2
5.4.2017 15.20.50	2670	3,50	-0,6	16,24	39,4	15,2	15,8	87,9	72,7
5.4.2017 15.21.20	2700	3,48	-0,8	16,35	39,6	15,1	15,9	88,4	73,3

Liite 7. Haartmaninkatu 3, tehon laskenta, energiamittaukset ja säästövaikutus

Tehon laskenta, energiamittaukset ja säästövaikutus
Anssi Malinen
Helsingin Yliopisto

JK 1.1 Virtamittaukset
Mitatut virta-arvot vaiheittain 12.1.2017

t	L1	L2	L3
klo	A	A	A
12:17:00	4,9	4,8	5,2
12:20:00	5,0	4,8	5,2
12:23:00	5,0	4,8	5,2
12:28:00	5,0	4,8	5,2
12:32:00	5,0	4,8	5,2

Kaikkien vaiheden virtamittausten keskiarvo klo 12:23:00

5,0 A

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

U 400 V
I 5,0 A
cos φ 0,85

2,94 kW

JK 1.1 Virtamittaukset
Mitatut virta-arvot vaiheittain 5.4.2017

t	L1	L2	L3
klo	A	A	A
14:59:00	4,8	4,6	5,0
15:08:00	4,9	4,6	5,1
15:12:00	4,7	4,4	5
15:17:00	4,7	4,4	5,0
15:22:00	4,7	4,5	4,9

Kaikkien vaiheden virtamittausten keskiarvo klo 12:23:00

4,9 A

$$P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi$$

U 400 V
I 4,9 A
cos φ 0,85

2,87 kW

Lauhtumisteho

JK 1.1 Liuosverkostoon siirtyvä teho 5.4.2017 hetkellä t1

$$\dot{Q} = q_v \cdot \rho \cdot c_v \cdot \Delta T$$

qv 0,24 dm³/s
ρ 1,05 kg/dm³
Cv 3,65 kJ/kg K
ΔT 10,4 K

9,57 kW

Lauhtumisteho QC hetkellä t1

10,50 kW

Kompressorin lämpöhäviöt

0,93 kW

Sähköenergian kulutus ennen muutoksia
Skadi greenline DF9020GL (arkku nr. 20)

Alku	klo	Loppu	klo	Σ E kWh	kWh/vrk	kWh/ a
12.1.2017	11:50	9.2.2017	11:50	448,2	16,01	5842,61

Sähköenergian kulutus ennen muutoksia
Panasonic VIP PLUS MDF-U76V (arkku nr. 18)

Alku	klo	Loppu	klo	Σ E kWh	kWh/vrk	kWh/ a
12.1.2017	11:55	9.2.2017	11:55	412,3	14,73	5374,63

Sähköenergian kulutus muutosten jälkeen
Skadi greenline DF9020GL (arkku nr. 20)

Alku	klo	Loppu	klo	Σ E kWh	kWh/vrk	kWh/ a
5.4.2017	14:39	3.5.2017	14:39	388,9	13,89	5069,59

Sähköenergian kulutus muutosten jälkeen
Panasonic VIP PLUS MDF-U76V (arkku nr. 18)

Alku	klo	Loppu	klo	Σ E kWh	kWh/vrk	kWh/ a
5.4.2017	14:40	3.5.2017	14:40	373,5	13,34	4868,84

Sähköenergian säästö
Skadi greenline DF9020GL (arkku nr. 20)

Vuotuinen säästö	468,0 kWh
Suhteellinen säästö	13,2 %
Sähkö hinta	0,1 €/ kWh
Vuotuinen säästö	42,1 €

Sähköenergian säästö
Panasonic VIP PLUS MDF-U76V (arkku nr. 18)

Vuotuinen säästö	505,8 kWh
Suhteellinen säästö	9,4 %
Sähkö hinta	0,1 €/ kWh
Vuotuinen säästö	45,5 €

Lämpöhäviön suhteellinen muutos syväjäähäpakkastimen vaipan yli

huonelämpötila alussa	26 °C
huonelämpötila lopussa	19 °C
lämpötila arkussa	-80 °C
muutos häviötehoon	-6,6 %

Kylmäprosessin vertailu
Prosessi 12.1.2017 hetkellä t0

Kylmäteho QE	4,50	kW
Lauhtumisteho QC	7,33	kW
Kompressorin teho W	2,94	kW
COP jäähdytys	1,53	

Prosessi 5.4.2017 hetkellä t1

Kylmäteho QE	7,74	kW
Lauhtumisteho QC	10,50	kW
Kompressorin teho W	2,87	kW
COP jäähdytys	2,70	

Prosessin suhteellinen muutos

QE	71,9	%
QC	43,3	%
W	-2,7	%
COP jäähdytys	76,6	%