

Veli-Matti Saloniemi

# Pikajäähdyttimen jäähdytyskapasiteetin mittausmenetelmän kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri AMK

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööriytyö

Päivämäärä 16.05.2014

Tekijä Otsikko  Sivumäärä Aika	Veli-Matti Saloniemi Pikajähdyttimen jäähdytyskapasiteetin mittaamenetelmän kehittäminen 59 sivua + 3 liitettä 16.05.2014
Tutkinto	Insinööri AMK
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	Lehtori Jarmo Perttula Tuotekehityspäällikkö Vesa Jumppanen, SeaKing
<p>Tämän insinööriyön tavoitteena on kehittää SeaKing-yritykselle selkeä menetelmä yrityksen valmistaman pikajähdyttimen jäähdytyskapasiteetin mittaamiseksi ja varmistamiseksi. Insinööriyössä kehitettyjä toimenpiteitä tullaan käyttämään yrityksen tehtaalla Puolassa pikajähdyttimien jäähdytyskapasiteettien mittauksia tehdessä.</p> <p>Työssä perehdytään aihetta koskevaan lämmönsiirron tekniikkaan ja kylmätekniikkaan, sekä tutkitaan minkälaisella teknisellä toimenpiteellä laitteen kapasiteetin voi perustellusti mitata. Mittausten tavoitteena on varmistaa SeaKingin pikajähdyttimien jäähdytyskapasiteetin vastaavan laivakeittiöiden hygieniaa valvovien organisaatioiden vaatimuksia. Työn kirjallisessa osiossa perehdytään näihin vaatimuksiin.</p> <p>Työssä käytetään hyväksi laitetta ohjaavaa logiikkaa. Logiikka pitää yllä laitteen toimintoja ja mittaa laitteen sisäisiä lämpötiloja erilaisten anturien avulla. Laitetta koskevia lämpötila- ja painetietoja tarkastellaan teknisillä mittalaitteilla.</p> <p>Työn tuloksena saavutettiin tavat mittaustoimenpiteiden suorittamiseen. Työn yhteenvedossa käsitellään mittauksessa kohdattuja haasteita ja tapoja, joilla kehitystyötä voidaan jatkaa.</p>	
Avainsanat	Pikajähdytin, jäähdytyskapasiteetti, mittaamenetelmä

Author Title Number of Pages Date	Veli-Matti Saloniemi The Development of Methods for Measuring the Cooling Capacity of a Quick Chilling Machine 59 pages + 3 appendices 16 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructor	Jarmo Perttula, Lecturer Vesa Jumppanen, Vice President Research and Development SeaKing Inc.
<p>The aim of this study is to develop a clear method for the cooling capacity measuring of a quick chilling machine manufactured by SeaKing Inc. The result of this research will be used at the company's factory in Poland for further inspections of the cooling capacity of quick chilling machines.</p> <p>The study focuses on the theoretical aspects of the heat transfer and the refrigeration technology in order to discover what kind of operation is reliable for measuring the cooling capacity of the quick chilling machine. The goal of these measurements is to ensure that the cooling capacity of the machine is equivalent to the requirements of the organizations in control of the hygiene regulations of marine kitchens.</p> <p>The study utilizes the programmable control logic of the machine. The logic maintains the operations of the machine by measuring different temperatures inside the machine with various sensors.</p> <p>The measuring methods were clarified as result of this study. The challenges of the measuring process and the possibilities for further development are reviewed in the synopsis of this study.</p>	
Keywords	Quick chilling machine, cooling capacity, measuring

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Hygieniavaatimukset laivakeittiöille	2
2.1	Vessel Sanitation Program	2
2.1.1	Määräysten valvominen	2
2.1.2	VSP:n määräykset pikajähdyttimestä	3
2.1.3	Jähdytyksen dokumentointi	4
2.2	Association Of Port Health	4
3	Termodynamiikan perusteet	5
3.1	Termodynamiikan pääsäännöt	5
3.2	Aineen olomuodot	8
3.3	Olomuodonmuutokset	9
3.3.1	Tilapiirros	10
3.3.2	Kylläinen neste ja kylläinen höyry	11
3.4	Lämpökapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti	12
3.5	Lämpöteho	13
3.6	Lämmön siirtyminen	13
3.6.1	Johtuminen	13
3.6.2	Konvektio	14
3.6.3	Säteily	15
4	Elintarvikkeiden ominaislämmöt	16
4.1	Siebelin kaava	16
4.2	Jäätymispiste	17
5	Höyryprosessi	18
5.1	Todellinen prosessi	20
5.2	Alijäähdytyminen	21
5.3	Jähdytinprosessin laskeminen	21
6	Kylmäaineet	24
6.1	Hyvän kylmäaineen ominaisuudet	24
6.2	Kylmäaineiden jaottelu	25
6.3	Jaottelu höyrystymis- ja lauhtumiskäyttötymisen mukaan	27

7	Jäähdytystehon tarve	28
7.1	Seinämien kautta tapahtuvat lämpöhäviöt	28
7.2	Ilman kosteuden tuoma lämpömäärä	30
7.3	Tuotteiden jäähdytyksen vaatima lämpöteho ja hengityslämmön teho	31
7.4	Koneiston aiheuttama lämmön lisäys	32
7.5	Tehontarve	32
8	Mittaustoimenpiteet	33
8.1	Mittausten runko	33
8.2	Jäähdytettävät tuotteet	33
8.3	Mittalaitteet	34
8.4	Sisäisen prosessin mittaustoimenpiteet	37
8.5	Lauhduttimen teho	40
8.6	Kompressorin ja höyrystimen teho	41
9	Jäähdytysteho	43
9.1	Tuotteiden sisälämpötilat	45
9.2	Tuotteiden jäähdytyksen tuoma lämpömäärä	49
9.3	Kosteuden tiivistymisen tuoma lämpömäärä	49
9.4	Koneiston aiheuttama lämpökuorma	50
9.5	Lämpöhäviöt seinämistä	51
9.6	Jäähdytystehon tarve	54
9.7	Ilman ominaisuudet	55
10	Päätelmät	56
10.1	Jäähdytettäviin tuotteisiin kohdistuvat toimenpiteet	56
10.2	Prosessin mittauksen parantaminen	57
10.3	Muut toimenpiteet	58
	Lähteet	59
	Liitteet	
	Liite 1. Log p,h -diagrammi kylmäaineelle R404A	
	Liite 2. Elintarvikkeiden lämpöominaisuuksia	
	Liite 3. Kuvakaappaus Excel-taulukosta	

## 1 Johdanto

Insinööriyössä perehdytään tapoihin, joilla SeaKing-yrityksen pikajäähdyttimen jäähdytyskapasiteetti voidaan mitata. Työn tarkoituksena on kehittää pikajäähdyttimen ulkoisten ja sisäisten prosessien mittaustapoja SeaKingin tehtaalla Puolassa. Tarvittaessa työssä kehitetyt toimenpiteet voidaan jatkossa toistaa. Työssä tehtyjä havaintoja käytetään yrityksen tehtaalla henkilökunnan ohjeistamiseen mittaustoimenpiteitä varten. Insinööriyössä käydään läpi lämmönsiirron perusteita, ja esitellään teoreettinen pohja pikajäähdytystapahtumalle. Mittaustoimenpiteet suoritetaan työssä esitellyin tavoin SeaKing-yrityksen tehtaalla Puolassa. Mittausmenetelmien kehitysehdotukset tehdään Puolassa havaittuihin puutteisiin ja kylmäalan teoriaan verraten.

SeaKing on risteilijälaivojen keittiöiden suunnitteluun erikoistunut yritys. Se valmistaa keittiöt kokonaistoimituksena. Suunnittelu kattaa yksittäisten tuotteiden – säilytyskaappien, jääkaappien, pakastimien – suunnittelun, keittiön layoutin eli pohjapiirustuksen tekemisen, projektionnin ja varaosat. Puhuttaessa laivojen sisustuksen suunnittelusta jää usein huomaamatta, miten suuri osa koko risteilijälaivasta on keittiötä ja catering-tiloja. Keittiöiden suunnittelu vaatii yllättävän laaja-alaista teknistä tuntemusta, joka kattaa esimerkiksi materiaali-, sähkö-, energia-, automaatio- ja kylmätekniikan. Teknisen erityistietämyksen lisäksi pitää olla ymmärrystä keittiön funktionaalisuudesta ja hygieniavaatimuksista. Tässä työssä keskitytään nimenomaan näiden hygieniavaatimusten täyttymiseen tietyn tuotteen kohdalla.

Insinööriyössä tarkastellaan pikajäähdyttimen jäähdytyskapasiteettia verraten sitä keittiöiden ja keittiölaitteiden hygieniää sekä standardeja säätelevien organisaatioiden normeihin ja säädöksiin. Pikajäähdyttimen toimintaa tarkastellessa hygieniajärjestöjen asettamat standardit ja määräykset rajaavat ajan, jossa ruoan pitää jäähtyä tietyistä lämpötilasta tiettyyn lämpötilaan.

## 2 Hygieniavaatimukset laivakeittiöille

Keittiölaitteita ja keittiöitä säädellään hygieniää, ergonomiää, työsuojelua ja luokituksia koskevin määräyksiin. Suomessa matkustajalaivoja koskevia määräyksiä säätelee Traffi, eli Finnish Transport Safety Agency. Kansainvälisiä risteilijälaivoja koskevat kuitenkin myös eri maiden omat normit ja lisäksi myös kansainväliset maiden yhteiset normit.

### 2.1 Vessel Sanitation Program

Terveysteen ja ruuanlaittoon liittyviä määräyksiä ohjaa Yhdysvalloissa organisaatio nimeltä Centers For Disease Control And Prevention (CDC). CDC on käynnistänyt ohjelman nimeltä Vessel Sanitation Program, (VSP), auttaakseen risteilijälaivateollisuutta ehkäisemään ja hallitsemaan ruoansulatuskanavan tautien pääsyä ja leviämistä risteilijälaivaliikenteessä. VSP:n määräysten tunteminen laivakeittiön suunnittelussa on tärkeää, sillä jokaisen USA:n satamaan tulevan ulkomaalaisen laivan, jossa on yli 13 matkustajaa, tulee läpäistä VSP:n tarkastukset. (13, s. 19.)

VSP hallinnoi ja tuottaa kahta laivakeittiöitä koskevaa julkaisua: Construction Guidelines ja Operations Manual. Construction Guidelines ohjeistaa laivojen rakennuksessa ja suunnittelussa huomioon otettavista asioista, esimerkiksi viemäröinnistä ja asennuksesta. Operations Manual määrittää ruokaan liittyvän toiminnan säännöt, vastaanottamisen, valmistamisen ja siivouksen. (13, s. 20.)

#### 2.1.1 Määräysten valvominen

VSP:n määräyksiä laivoilla valvoo järjestö nimeltä United States Public Health Service, (U.S.P.H.S), erilaisin tarkastuksin. Suunnittelua valvotaan *plan review* -tarkastuksilla, joiden tarkoituksena on varmistaa, että keittiölaitteiden sijainti ja määrä on määräysten mukainen. Laivaa rakentaessa suoritetaan *on-site shipyard construction* -tarkastus, sekä laivan valmistuttua tehdään *final construction* -tarkastus. Laivojen operoidessa tehdään lisäksi pistokoe-tarkastuksia vähintään kaksi kertaa vuodessa. (13, s. 21.)

U.S.P.H.S ja CDC raportoivat tarkastuksista julkaisuun, joissa laivojen hygieniataso pisteytetään. Pisteytyksessä 100 pistettä on maksimi. Varustamot haluavat läpäistä tarkastukset mahdollisimman korkealla pistemäärällä, sillä korkea pistetaso on signaali kuluttajalle tasokkaasta laivasta. Pisteet alenevat laivalla havaituista terveydellisistä

haitoista ja määräysten laiminlyönneistä. U.S.P.H.S:lla on oikeus laivan pysäyttämiseen, mikäli laivalla ilmenee vakavanlaatuinen rike, esimerkiksi juomaveden huono laatu tai muu vakava terveydellinen riski. (13, s. 19 - 22.)

### 2.1.2 VSP:n määräykset pikajäähdyttimestä

VSP määrittelee pikajäähdyttimen ”laitteeksi, joka on suunniteltu erityisesti elintarvikkeiden nopeaan jäähdytykseen 57 °C:sta (135 °F) 21 °C:seen (70 °F) 2 tunnin kuluessa ja edelleen 21 °C:sta (70 °F) 5 °C:seen (41 °F), tai alle, seuraavan 4 tunnin aikana”. Tämä ohjeistus on siten yksi edellytys SeaKingin pikajäähdytintä suunnitellessa. Ohjeistus koskee määriteltyä ns. potentiaalisesti vaarallista ruokaa *potentially hazardous food*, tai turvallisuuden vuoksi aikaan tai lämpötilaan liittyvää valvontaa vaativaa ruokaa *time/ temperature control safety food*. Tämä määritellään seuraavasti VSP:n manuaalissa (14, s. 43):

- Ruoka kykenee tukemaan nopeaa vaihtelevaa tarttuvien ja myrkyllisten mikro-organismien kasvua.
- Ruoka kykenee tukemaan toksisen *Crostitium Botulinum* -suolistobakteerin kasvua.
- Ruoka kykenee tukemaan salmonellan kasvua.

Jäähdytykselle asetetut rajat perustuvat siihen havaintoon, että mikro-organismit, haitalliset ja haitattomat, kasvavat parhaiten 20 - 60 °C:n välillä. Toisaalta 70 °C:n yläpuolella mikro-organismit kuolevat ja 20 °C:n alapuolella mikro-organismien kasvu väheenee eksponentiaalisesti. Jäähdyttäminen on tehokas ja käytännöllinen tapa vähentää mikro-organismien kasvua sekä lisätä ruoan käytettävyyssäikää elintarvikkeena. (9, s. 3.)

Potentiaalisesti vaarallinen ruoka pitää sisällään kaikki eläinperäiset ruoat ja leikatut vihannekset. Näitä ovat periaatteessa kaikki elintarvikkeet, joita ei ole säilötty tai prosessoitu niin, että se estäisi bakteerikasvua. VSP:n määritelmä noudattelee yhdysvaltain hallituksen ruoka- ja lääkehallinnon *Food And Drug Administrationin* (FDA) määritelmää potentiaalisesti vaarallisesta ruoasta. (14, s. 53.)

Lisäksi valmisruualle on omat säädöksensä. Huoneenlämpöiset säilykkeet ja valmisruoat tulee myös jäähdyttää, mikäli ne on preparoitu eli otettu niitä suojaavasta pakka-



uksesta valmistusta varten. Kyseisille ruuille määrätään jäähdytys senhetkisestä lämpötilasta 4:ssä tunnissa 5 °C:seen (41 °F). (14, s. 127.)

### 2.1.3 Jäähdytyksen dokumentointi

Laivalla tulee säilyttää dokumentointia potentiaalisesti vaarallisten ruokien jäähdytyksestä, koskien myös huoneenlämmöstä jäähdytettyjä valmisruokia. Dokumentointi tulee suorittaa jäähdytystapahtumasta 2 ja 6 tunnin kontrollipisteiden välillä. Tämä tarkoittaa käytännössä ruoan lämpötilaa 2 tuntia ja 6 tuntia jäähdytyksen alkamisesta. Näistä kontrollipisteistä tulee säilyttää logidokumenttia 30 päivän ajan jäähdytystapahtuman alkamisesta. (14, s. 128.)

## 2.2 Association Of Port Health

Yhdistyneissä kansakunnissa risteilijälaivojen hygienia-asioita valvovat Association Of Port Health ja Health Protection Agency -nimiset toimielimet. Nämä yhdistykset valvovat, että risteilijälaivoissa noudatetaan Yhdistyneiden Kansakuntien yhteisiä ruoan hygieniaa koskevia lakeja ja säädöksiä. Ruokaa koskevia standardeja ylläpitää ja päivittää toimielin nimeltä Food Safety Agency. Pikajäähdyttimiä koskeva lakisäädös löytyy julkaisusta "The Guidelines for Cook-chill and Cook-freeze Systems", jossa määrätään muun muassa, että vastavalmistettu ruoka pitäisi jäähdyttää pikajäähdyttimellä 0 °C:n ja 3 °C:n välille 90 minuutissa.

### 3 Termodynamiikan perusteet

Kylmäkoneen toiminta perustuu termodynamiikkaan. Termodynamiikka, toiselta nimeltään lämpöoppi, käsittelee energian muuttamista muodosta toiseen. Termodynamiikka käsittelee ilmiöitä, joissa lämpönä esiintyvä energia muuttuu toisenlaiseksi energiamuodoksi tai takaisin lämmöksi. Termodynamiikan prosessit ovat olennaisessa osassa erityisesti voimalaitoksissa, ilmastoinnissa, polttomoottoreissa, lämpöpumpuissa ja kylmäkoneissa.

#### 3.1 Termodynamiikan pääsäännöt

##### 0. pääsääntö, lämpötila

Lämpötila on fysikaalinen suure, joka kuvaa esineen tai aineen kuumuutta ja kylmyyttä. Molekyylitasolla lämpötila on atomien liikkeeseen sitoutunutta energiaa. Lämpötila näkyy atomien liikkeessä; mitä nopeampaa ja tasaisempaa liike on, sitä korkeampi on aineen lämpötila. Termodynamiikan 0. pääsääntö määrää, että eristetyssä systeemissä lämpötilat tasaantuvat. Toisin sanoen kappaleiden lämpötilaerot tasaantuvat joutuesaan kosketuksiin toistensa kanssa eristetyssä systeemissä. (1, s. 224.)

##### 1. pääsääntö, sisäenergia ja entalpia

Termodynamiikan 1. pääsääntö esittelee aineen tilaa kuvaavan määritteen, sisäenergian,  $U$ . Tiettyyn systeemiin sisältyvien energioiden summa on nimeltään sisäenergia. Se voi koostua erilaisista energialajeista, muun muassa värähdysliikkeen liike-energiasta, molekyylien liike-energiasta, sekä atomi- ja ydinsidosten potentiaalienergioista. Sisäenergiaa mitataan sisäenergian muutoksella,  $\Delta U$ , sillä sen arvoja ei voida käytännössä mitata. Energian muuttumista lämmöksi voidaan kuvata esimerkiksi polkupyörän jarrutuksella, jossa kitkaa, eli mekaanista energiaa muuttuu lämmöksi. Tyypillisin työnmuoto termodynamiikassa on tilavuuden muutostyö, esim. eristetyssä sylinterissä tapahtuva puristustyö. Puristaessa sylinterin mäntää tietyn matkan, tehdään työtä painetta vastaan, tilavuus pienenee ja ilma lämpenee. Lämpeneminen johtuu systeemiin tehdystä työstä. (1, s. 226.)

Ainoastaan energiasiirot ympäristöstä tai energian luovuttaminen ympäristöön vaikuttaa sisäenergianmuutokseen. Yksinkertaisesti: *Systeemiin tuotu energia voi muuttua toisiksi energiamuodoiksi, mutta energian kokonaismäärä ei muutu.* (1, s. 227.)

Sisäenergian muutosta laskennassa kuvataan suureella nimeltä entalpia, jonka muutos on loppu- ja alkutilan entalpioiden erotus.

Entalpia kaavamuodossa:

(1)

$$H = U + pV [J]$$

$$U = \text{systeemin sisäenergia [J]}$$

$$p = \text{systeemin paine [Pa]}$$

$$V = \text{systeemin tilavuus [m}^3\text{]}$$

Usein entalpia esitetään ominaisentalpiamuutoksen,  $\Delta h$ , avulla.

(2)

$$\Delta h = c_p \Delta T [kJ/kg]$$

$$c_p \text{ ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa [kJ/kgK]}$$

$$\Delta T \text{ lämpötilaero } (T_1 - T_2) [K]$$

## 2. pääsääntö, entropia ja entropian kasvu

Entropia mittaa systeemin epäjärjestyksen määrää eli systeemin sisäenergian sisäistä järjestäytyneisyyttä. Entropialla selitetään termodynaamisten ilmiöiden luonnetta ja suuntaa. Molekyylitasolla 2. pääsääntö näkyy molekyyliden pyrkimyksellä luonnollisimpaan tilaansa eli ns. tasapainotilaan. Entropia saavuttaa tasapainotilassa maksimiarvonsa, ja kaikkien luonnollisten prosessien suunta on tasapainotilaan. Siksi systeemin entropia voi ainoastaan kasvaa, se ei koskaan pienene. (1, s. 228.)

Entropiaa usein havainnollistetaan jääkuutioiden sulamisella juomalasissa. Jääkuutioiden pyrkimässä kohti luonnollista tasapainotilaansa eli sulan veden tilaa, vesimolekyylit sekoittuvat juomaan. Jääkuutioiden sulaessa entropia kasvaa. Jääkuutiot ja juoma eivät voi enää järjestäytyä erilleen kuutioiksi ja nesteeksi, sillä niiden järjestäytyminen uudelleen vaatisi erillistä työtä. Lämpötilaeron tasoittuessa juoman sisällä ei lämpötilaeroakaan voi ilman ulkopuolista työtä kasvaa. Aine on saavuttanut suurimman entropiansa, mikään muutos systeemissä ei ole mahdollinen tämän jälkeen ilman ulkopuolista

voimaa. Yksinkertaistettuna: *Eristetyn systeemin luonnollinen muutos tilasta toiseen voi tapahtua vain, jos siihen liittyy entropian kasvu.* (1, s. 229.)

Entropian virallinen määritelmä, entropian muutos  $\Delta S$  esitetään kaavamuodossa seuraavasti:

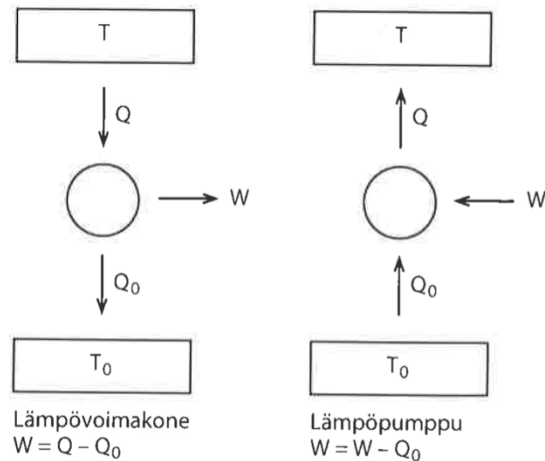
$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \quad (3)$$

$\Delta Q$  lämpö määrän muutos [J]  
 $T$  lämpötila [J]

Termodynamiikan 2. pääsääntö selittää lämpövoimakoneen toiminnan. Suurin saatavissa oleva työ lämpövoimakoneessa, tai lämpöpumpussa teoreettisella Carnot-prosessilla. Suurin saatavissa oleva työ on kulutetun työn ja systeemiin tuodun työn erotus (1, s. 230):

$$W = Q - Q_0 \quad (4)$$

Kuvassa 1 on esitetty Carnot-prosessin mukainen lämpövoimakoneen ja lämpöpumpun toimintaperiaate. Ideaalinen teoreettinen kylmäkone toimii saman periaatteen mukaisesti, mutta päinvastaisessa järjestyksessä. Lämpöpumput ja kylmäkoneet ovat periaatteiltaan samoja koneita; niillä on vaan päinvastainen tavoite. Kylmäkoneen tavoite on pitää kylmä tila kylmässä lämpötilassa siirtämällä lämpöä pois. Lämmön purkaminen korkeammassa lämpötilassa olevaan tilaan on vain pakollinen osa toimintaa, ei tavoite. Vastaavasti lämpöpumpun toimintaperiaate on pitää lämmitetty tila korkeassa lämpötilassa. Tämä saavutetaan siirtämällä lämpöä kylmään ulkoilmaan ja jakamalla sitä eteenpäin lämpimään tilaan. (12, s. 281.)



Kuva 1. Lämpövoimakoneen ja lämpöpumpun toimintaperiaate (1, s. 230)

Lämpöpumppujen ja kylmäkoneiden toimintaa arvioidaan COP-arvolla. COP, eli *Coefficient of Performance*, ilmaisee saadun työmäärän suhteen käytettyyn työhön. Kylmäkoneen COP:n laskemiseen perehdytään työn höyryprosessia käsittelevässä osiossa.

### 3.2 Aineen olomuodot

Yleisesti aineet esiintyvät kolmessa eri olomuodossa: kiinteä, neste ja kaasu. Käyttäen vettä esimerkkinä nämä olomuodot ovat kiinteä jää, nestemäinen vesi ja kaasumainen vesihöyry.

Kiinteässä aineessa atomit ja molekyylit ovat rakentuneet kullekin aineelle ominaiseksi hilarakenteeksi. Tässä hilassa atomien järjestysaste on erittäin korkea, ja atomien väliset etäisyydet on tarkasti määritelty. Atomit ja molekyylit ovat siitä huolimatta jatkuvasti liikkeessä niin kauan kuin pysytään absoluuttisen nollapisteen yläpuolella. Atomien liike voimistuu lämpötilan noustessa. (1, s. 236.)

Nestemäinen aine on hilarakenteeltaan hyvin samanlainen kiinteän aineen kanssa. Nestemäisen aineen koostumus poikkeaa siten, että aineen atomien välinen etäisyys on merkittävästi suurempi verrattuna kiinteään aineeseen. Etäisyseron aiheuttaa aineeseen tuotu lämpö, joka lisää atomien välissä vapaasti liikkuvien elektronien liikemäärää. Atomien etäisyyden kasvu merkitsee järjestysasteen kasvua, eikä nestemäisellä aineella ole siis tarkkaan määrättyä hilarakennetta. Aineen ollessa nesteenä ato-

mit ja elektronit ovat vielä vahvasti sidoksissa toisiinsa ja vastustavat pinta-alan kasvamista. (1, s. 237.)

Kaasumaisessa aineessa vapaasti liikkuvien elektronien liikemäärä on kasvanut niin paljon, että aineella ei ole enää kykyä sitoa atomeja toisiinsa. Tämä aiheuttaa atomien vapaan liikkuvuuden aineessa. Hilarakenteen katoaminen aiheuttaa sen, että aineen ollessa kaasuna tilavuus kasvaa merkittävästi verrattuna aineen kiinteään ja nestemäiseen olomuotoon. Paine aiheutuu kaasuatomien törmäilystä erilaisiin rajapintoihin. Kaasun paine on sitä suurempi, mitä enemmän törmäilyä tapahtuu. Mitä pienempään tilavuuteen kaasu pakotetaan, sitä suuremmaksi kaasun paine kasvaa. Kaasun painetta voidaan kasvattaa myös lämmittämällä suljetussa tilassa olevaa kaasua, jolloin kasvatetaan kaasuatomien liikemäärää ja paine nousee. (1, s. 237.)

### 3.3 Olomuodonmuutokset

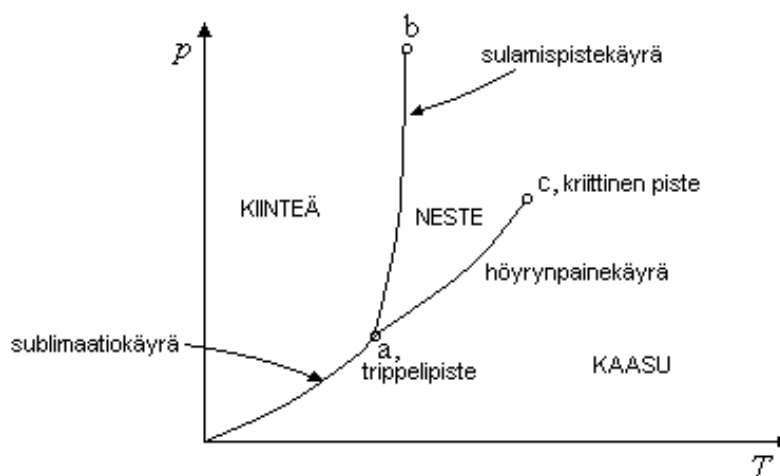
Olomuodon- tai faasimuutoksella tarkoitetaan aineen siirtymistä yhdestä olomuodosta toiseen. Olomuodonmuutokset puhtailla aineilla tapahtuvat vakio-*lämpötilassa*. Muutokseen liittyy aina tietyn suuruinen lämpömäärän ja tilavuuden muutos. Tämän muutoksen suuruus riippuu aineeseen kulloinkin vaikuttavasta ulkoisesta lämpötilasta ja paineesta. Faasimuutokseen tarvittavaa lämpömäärää massayksikköä kohden kutsutaan latentiksi lämmöksi. Vastaavasti lämpötilan muuttamiseen tarvittavaa lämpömäärää kutsutaan tuntuvaksi lämmöksi. Kylmätekniikan kannalta on hyvä ymmärtää, että aineen höyrystymislämpötila, *piste jossa aine muuttuu nesteestä höyryksi*, riippuu myös aineeseen vaikuttavasta paineesta. On epäkorrektia sanoa, että vesi kiehuu 100 °C:n lämpötilassa. Korrektimpaa olisi sanoa, vettä vesi kiehuu 100 °C:ssa normaalien ilmanpaineen vaikuttaessa. Toisin sanoen vuoristossa vesi kiehuu alemmassa lämpötilassa kuin meren rannalla. (1, s. 238.)

### 3.3.1 Tilapiirros

Kullekin aineelle ominaiset olomuodonmuutokset esitetään erilaisten tilapiirrosten avulla. T, p -tilapiirros ilmaisee olomuodonmuutokset paineen ja lämpötilan avulla. T, p -tilapiirros esittää olomuodonmuutoksien rajakäyrät (1, s. 238):

- Sulamiskäyrä, kiinteän ja nestemäisen aineen rajakäyrä.
- Höyrystymiskäyrä, nestemäisen ja kaasumaisen aineen rajakäyrä.
- Sublimoitumiskäyrä, kiinteän ja kaasumaisen aineen rajakäyrä.

Rajakäyrien yhtymispistettä kutsutaan kolmoispisteeksi eli trippelipisteeksi. Kolmoispisteessä esiintyy kaikkia kolmea faasia samanaikaisesti. Trippelipiste on kylmätekniikan kannalta olennainen, sillä se määrää käytettävien kylmäaineiden alhaisimman käyttölämpötilan. Trippelipisteessä aineessa on kiinteää faasia, joten kylmäkone ei voi toimia siinä tai sitä alhaisemmissa lämpötiloissa komponenttien rikkoutumisriskin takia. Kuvan 2 tilapiirros esittää aineen rajakäyrät.



Kuva 2. Tilapiirros

Kriittinen piste on tilapiste, jossa lämpötila ja paine ovat suurimmat tilanteelle, jossa aineen nestemäinen ja kaasumainen faasi voivat olla samanaikaisesti olemassa. Aineessa ei tapahdu enää normaalia tiivistymistä kriittistä pistettä korkeammassa paineissa. (1, s. 238.)

Olomuodonmuutokset yksinkertaisesti esitettynä (1, s. 238 - 244):

- Sulaminen, kiinteän aineen muuttuminen nestemäiseksi.
- Höyrystyminen (kiehuminen), nestemäisen aineen muuttuminen kaasumaiseksi.
- Tiivistyminen (kondensoituminen), kaasumaisen aineen muuttuminen nestemäiseksi. Käänteinen prosessi höyrystymiselle.
- Jähmettyminen, nestemäisen aineen muuttuminen kiinteäksi. Käänteinen prosessi sulamiselle.
- Sublimoituminen, kiinteän aineen muuttuminen suoraan kaasumaiseksi aineeksi. Olomuodonmuutos tapahtuu, kun lämpötila ja paine ovat kolmoispisteen arvoja pienemmät.
- Härmistyminen, kaasumaisen aineen muuttuminen suoraan kiinteäksi aineeksi. Käänteinen prosessi sublimoitumiselle.

Kaikki olomuodonmuutokset vaativat energiaa toteutuakseen. Riippuen aineen ominaiskäyttäytymisestä puhutaan joko vapautuvasta lämpömäärästä tai sitoutuvasta lämpömäärästä. Kylmäteknikan kannalta tärkeät tapahtumat ovat höyrystyminen ja tiivistyminen. Kylmäkoneessa kylmäaineen höyrystymiseen tarvittava työ otetaan jäähdytettävien objektien, tai ympäristön lämmöstä. Kylmäaineen tiivistyminen taas puolestaan tapahtuu lauhduttimessa, jossa lämpöä luovuttamalla ulkoilmaan, tai johonkin muuhun aineeseen saadaan aikaiseksi tiivistyminen.

### 3.3.2 Kylläinen neste ja kylläinen höyry

Höyrystymiseen ja tiivistymiseen liittyvät kylläisen nesteen ja kylläisen höyryn käsitteet. Höyrystymispisteessä olevaa nestemäistä ainetta, jossa ei ole vielä yhtään höyrykuplaa kutsutaan kylläiseksi nesteeksi. Kylläiseksi höyryksi puolestaan kutsutaan kaasumaista tiivistymispisteessä olevaa ainetta, jossa ei ole vielä yhtään nestepisaraa. Höyrystymiseen liittyy myös tulistuneen höyryn käsite. Tulistuneella höyryllä tarkoitetaan vallitsevaa painetta vastaavaa lämpötilaa korkeampaan lämpötilaan lämmennyttä ainetta. Tulistumista tapahtuu kylmäkoneessa kompressorin puristuksessa ja höyrystimissä. Tiivistymiseen liittyy myös tärkeä käsite ”alijäähtynyt neste”. Neste on alijäähtynyt, kun se on jäähtynyt vallitsevaa painetta vastaavaa lauhtumislämpötilaa alempaan lämpötilaan. Kylmäaineen käytöstä kylmäkoneistossa kuvataan höyryprosessia kuvavassa osiossa. (1, s. 242 - 243.)



### 3.4 Lämpökapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti

Laskennassa käytetään usein käsitteitä lämpökapasiteetti ja ominaislämpökapasiteetti. Lämpökapasiteetti määritellään jonkin kappaleen kyvyksi sitoa lämpöä itseensä. Lämpökapasiteetti on jokaiselle aineelle erilainen ominaisuus. Lämpökapasiteettia kuvaavaa suuretta merkitään isolla  $C$ -kirjaimella. Se lasketaan jakamalla kappaleeseen tuotu lämpömäärä vastaavalla lämpötilan muutoksella. Kaavamuodossa (1, s. 245):

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad [J/K] \text{ tai } [J/^{\circ}C]$$

$Q$  lämpömäärä [J]  
 $T$  lämpötilamuutos [K] tai [°C]

(5)

Lämpökapasiteetti voidaan myös ilmaista aineen massayksikköä kohti laskettuna lämpökapasiteettina. Silloin nimitys muuttuu ominaislämpökapasiteetiksi. Ominaislämpökapasiteetti merkitään pienellä  $c$ -kirjaimella. Se lasketaan jakamalla kappaleeseen tuotu lämpömäärä kyseisen kappaleen massan ja lämpötilan muutoksella. Kaavamuodossa (1, s. 245):

$$c = \frac{Q}{\Delta m T} \quad [J/kgK] \text{ tai } [J/kg^{\circ}C]$$
(6)

Tämän tarkastelun perusteella lämpökapasiteetin ja ominaislämpökapasiteetin yhteys on seuraavanlainen:

$$c = \frac{C}{m}$$

$c$  ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]  
 $C$  lämpökapasiteetti [J/K]  
 $m$  massa [kg]

(7)

Ominaislämpökapasiteetti määritetään erilaisia laskutoimituksia varten joko vakioaineessa tai vakiotilavuudessa. Merkintätavat muuttuvat kulloisenkin tilanteen mukaan. Vakioaineessa käytetään merkintää  $C_p$  ja  $c_p$ , Vakiotilavuudessa käytetään merkintää  $C_v$  ja  $c_v$ . (1, s. 245.)

### 3.5 Lämpöteho

Teholla tarkoitetaan työn suhdetta siihen kulutettuun aikaan. Lämpöteho,  $\phi$ , ilmaisee massan jäädyttämiseen tai lämmittämiseen kuluneen työn suhteessa työhön kuluneeseen aikaan. Lämpöteho määritetään seuraavasti (1, s. 246):

$$\phi = \frac{Q}{t} = \frac{mc_p(T_2 - T_1)}{t} = \frac{m(h_1 - h_2)}{t} \quad (8)$$

Käytännön sovelluksissa tehonmääritys tulee vastaan muodossa, jossa tunnetaan putkessa virtaavan aineen tilavuus- tai massavirta. Tällöin sama yhtälö saa muodon:

$$\phi = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p\Delta h \quad (9)$$

$\dot{m}$  massavirta [kg/s]  
 $\Delta T$  lämpötilamuutos [K] tai [°C]  
 $\Delta h$  entalpiamuutos [J/K] tai [°C/K]

### 3.6 Lämmön siirtyminen

Lämmön siirtyminen perustuu kahden toistensa läheisyydessä olevan kappaleen välisen lämpötilaeron tasoittumiseen. Kappaleiden lämpötilojen ollessa yhtä suuret ovat lämpötilaerot tasoittuneet termodynamiikan 0. pääsäännön mukaisesti. Lämmönsiirron suunta on termodynamiikan 2. pääsäännön mukaan korkeammasta lämpötilasta matalampaan päin. Lämmönsiirrolla on kolme mekanismia: johtuminen, konvektio ja säteily. (1, s. 250.)

#### 3.6.1 Johtuminen

Johtuminen tapahtuu kahden kosketuksissa olevan kappaleen välillä. Aineen sisään muodostuu lämpötilaero aineeseen vaikuttavan lämpötilan kasvaessa. Vapaiden elektronien liike lisääntyy lämpötilan kasvun seurauksena. Liikemäärä saa atomit ja elektronit törmäilemään vieressä paikallaan oleviin tai pienemmän liikemäärän omaaviin atomeihin ja elektroneihin. Pienemmän liikemäärän omaavat atomit saavat törmäyksissä osan niihin törmäävien atomien ja elektronien liike-energiasta. Liike-energian kasvaes-

sa ne törmäävät niiden viereisiin ja ilmiö kumuloituu. Etenevä lämpö siirtyy tällä tavoin koko aineen läpi, kunnes tasapainotila on saavutettu. Johtumista tapahtuu pikajähdyttimissä mm. lauhduttimen ja höyrystimien lämmönsiirtimissä. Lämmönsiirtopintojen materiaalit valitaan johtumisominaisuuksien mukaan. (1, s. 251.)

### 3.6.2 Konvektio

Konvektio on olennainen asia pikajähdyttimien toimintaan perehtyessä, sillä merkittävin osa niiden jäähdytystehosta välittyy konvektion avulla. Konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistä kaasumaisen tai nestemäisen aineen avulla. Aine virtaa kappaleen ohi, ja lämpöä siirtyy kappaleeseen tai ohi virtaavaan aineeseen. Kappaleen ollessa korkeammassa lämpötilassa kuin sen ohi virtaava aine, siirtyy lämpöä ohi virtaavaan aineeseen. Ohivirtaavan aineen ollessa korkeammassa lämpötilassa, siirtyy lämpöä virtaavasta aineesta kappaleeseen. Konvektiossa kappaleen pintaan muodostuu rajakerros, jossa ohitse virtaavan aineen nopeus on nolla ja jossa ohi virtaavan aineen ja kappaleen lämpötilat ovat samansuuruiset. Tämän rajakerroksen ominaisuudet riippuvat mm. Kappaleen geometriasta, virtausnopeudesta ja ohi virtaavan aineen ominaisuuksista. (1, s. 252.)

Konvektio voi olla luonnollista tai pakotettua. Luonnollisen konvektion lämmönsiirto perustuu lämpötilaeron aiheuttamaan tiheyseroon kappaletta lähellä olevassa aineessa. Tämä havainnollistuu kuuman maan läheisyydessä olevan kuuman ilman kohoamisena ylöspäin. Pakotetussa konvektioissa virtaus aiheutetaan ulkoisella voimalla. Pikajähdyttimissä konvektiota tehostetaan voimakkaalla puhalluksella ja imulla pikajähdyttimen sisällä. Lämmön siirron tehokkuutta rajakerroksessa kuvataan konvektion lämmönsiirtokertoimen,  $\alpha_k$ , avulla. (1, s. 252.)

Lämmönsiirtokertoimen yksikkö on  $[W/m^2K]$ . Konvektion lämpöteho,  $\emptyset$ , lasketaan seuraavasti:

$$\emptyset = \alpha_k A (T_p - T_{va}) \quad [W/m^2] \quad (10)$$

$\alpha_k$  konvektion lämmönsiirtokerroin  $[W/m^2K]$   
 $A$  pinnan pinta – ala  $[m^2]$   
 $T_p$  pinnan lämpötila  $[K]$   
 $T_{va}$  virtaavan aineen lämpötila  $[K]$

Pakotettu konvektio on tehokkain lämmönsiirtomuoto. Käytännön sovelluksissa pyritään lämpö yleensä siirtämään pakotetun konvektion avulla.

### 3.6.3 Säteily

Säteily on lämmön siirtymistä kappaleesta ympäristöön tai toiseen kappaleeseen sähkömagneettisina aaltoina tai fotoneina. Säteily on riippuvainen säteilyn aallonpituudesta, ja etenee valonnopeudella. Kaikki pinnat, joiden lämpötilat ovat absoluuttista nollapistettä korkeampia, lähettävät eli emittoivat säteilyä. Hehkuvassa raudassa näkyy havainnollisesti raudan emittoima lämpösäteily. (1, s. 254.)

Kaikki kappaleet voivat myös termodynamiikan 1. pääsäännön mukaisesti ottaa vastaan säteilyä, sillä emittoitu säteily ei voi hävitä, vaan sen on imeydyttävä toiseen olomuotoon. Säteilyn osuessa kappaleen pintaan osa säteilystä imeytyy eli absorboituu, osa heijastuu kappaleesta ja osa voi mennä kappaleen läpi. Absorboituva säteily voidaan havainnoida kappaleen lämpötilan nousuna. (1, s. 255.)

## 4 Elintarvikkeiden ominaislämmöt

Ruokien jäädyttäminen aiheuttaa merkittäviä haasteita kylmäkoneiston suunnittelussa, sillä ruokien lämpöön liittyvät fyysiset ominaisuudet vaihtelevat selvästi ruokalajien välillä. Lisäksi elintarvikkeiden ominaisuudet muuttuvat ajan ja lämpötilan vaikutuksesta, siksi ruokien tuottamaa lämpötehoa laskiessa käytetään kokein määriteltyjä ominaislämpökapasiteetteja (liite 2). Hedelmät ja vihannekset tarjoavat erityisiä haasteita, sillä ne tekevät lämpöä vielä säilytyksessä ollessaan ja luovuttavat kemiallisten reaktioiden seurauksena hiilidioksidia, vesihöyryä ja muita kaasuja. (9, s. 10.)

### 4.1 Siebelin kaava

Ruokien lämpöominaisuudet määräytyvät niiden vesipitoisuuden mukaan. Ruokien ominaislämpökapasiteetit ja latenttilämmöt lasketaan kohtalaisella tarkkuudella pelkäämään niiden vesipitoisuuden perusteella. Aikaisemmin tässä työssä määritetty ominaislämpökapasiteetti  $c_p$  määritetään laskennallisesti Siebelin kaavalla (9, s. 10.):

(11)

$$c_{p,tuore} = 3,35a + 0,48 \text{ [kJ/kgK]}$$

$$c_{p,jäätynyt} = 1,26a + 0,48 \text{ [kJ/kgK]}$$

$c_{p,tuore}$  ominaislämpökapasiteetti tuotteelle joka ei ole jäätynyt [kJ/kgK]

$c_{p,jäätynyt}$  ominaislämpökapasiteetti tuotteelle joka on jäätynyt [kJ/kgK]

$a$  tuotteen vesipitoisuus [osuutena]

Esimerkkinä ominaislämpö kanalle, jonka vesipitoisuus on 74 %:

(12)

$$c_{p,tuore} = 3,35 \cdot 0,74 + 0,48 = 3,32 \text{ kJ/kgK}$$

$$c_{p,jäätynyt} = 1,26 \cdot 0,74 + 0,48 = 1,77 \text{ kJ/kgK}$$

Ruokien jäätymisen latenttilämpö eli jäätymisen faasimuutokseen tarvittava lämpö riippuu myös vastaavalla tavalla ruoan vesipitoisuudesta:

(13)

$$h_l = 334 \cdot a \text{ [kJ/kg]}$$

Jossa  $a$  on ruoan vesipitoisuus ja  $334 \text{ kJ/kg}$  on veden jäätymisen latenttilämpö lämpötilassa  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  normaalissa ilmanpaineessa.

## 4.2 Jäätymispiste

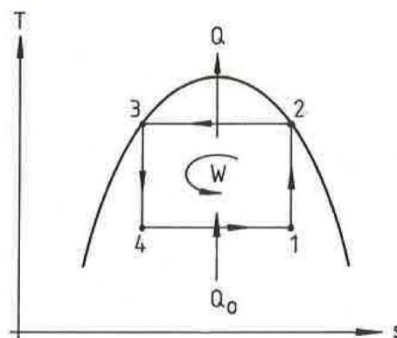
Yleisesti voimme odottaa ruoka-aineiden jäätyvän normaalissa ilmanpaineessa 0 °C:n lämpötilassa, joka on puhtaan veden jäätymispiste vastaavissa olosuhteissa. Toisaalta ruuissa oleva vesi ei ole puhdasta, mikä johtaa siihen, että jäätymispiste on jonkin verran 0 °C:n alapuolella riippuen kyseessä olevan ruoan rakenteesta. Ruokien voidaan odottaa jäätyvän pikemminkin tiettyjen lämpötilojen välillä kuin yhdessä tietyssä lämpötilassa. Tämä johtuu siitä, että nesteen kompositio muuttuu, kun osa ruoasta jäätyy, esimerkiksi jäätymättömän osuuden sokeripitoisuus kasvaa. Suurimmalla osalla ruuista jäätymislämpötila on jossain -0,3 °C:n ja -0,8 °C:n välillä. Tarkempien taulukoiden puuttuessa voidaan olettaa, että lihatuotteet jäätyvät -2 °C:ssa ja kasvikset ja hedelmät -1 °C:ssa. (9, s. 10.)

## 5 Höyryprosessi

Kiertoprosessien ideaalinen vertailuprosessi on Carnot-prosessi (kuva 3). Siinä oletetaan, että höyrystymisessä ja lauhtumisessa lämpötila pysyy vakiona. Ideaalista prosessia ei voi kuitenkaan saavuttaa täydellisesti käytännön toteutuksessa tapahtuvien häviöiden takia. Höyryprosessien laskennassa ja mallintamisessa käytetään siitä huolimatta apuna Carnot-prosessin muotoa. Carnot-prosessi on reversiibeli eli sen oletetaan toimivan myös käänteisessä muodossa. Käänteisessä muodossa se muuttuu lämpövoimakoneen prosessista kylmäprosessiksi. (12, s. 59; 7, s. 610.)

Carnot-kylmäprosessi (7, s. 610):

- 1 - 2 Isentrooppinen puristus, jossa entropia ei muutu, lämpötila ja paine kasvavat.
- 2 - 3 Isoterminen lauhtuminen vakioaineessa ja vakio lämpötilassa. Kylmäaine muuttuu kylläisestä höyrystä kylläiseksi nesteeksi.
- 3 - 4 Paisunta vakio lämpötilassa. Lämpötila ja paine laskevat isentrooppisesti, eli entropia ei muutu.
- 4 - 1 Höyrystyminen vakioaineessa ja vakio lämpötilassa. Kylmäaine absorboi lämmön isotermisesti.



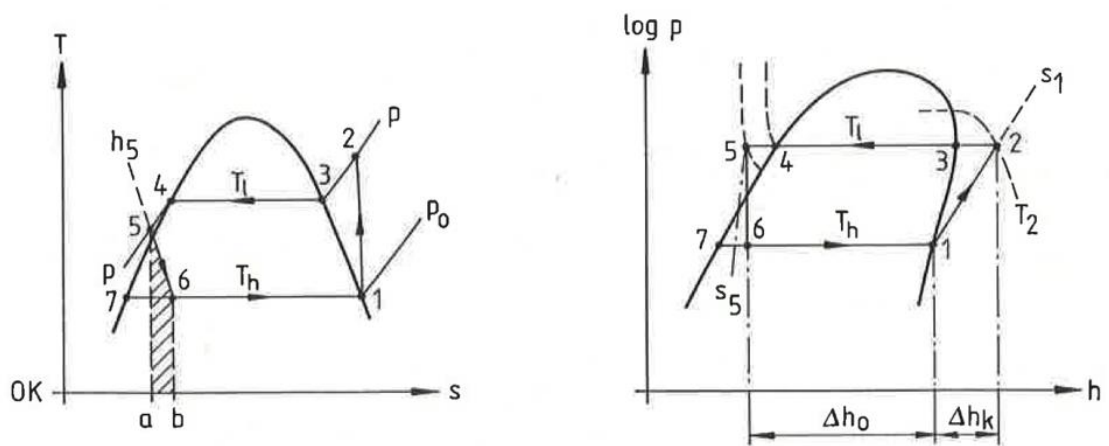
Kuva 3. Carnot-prosessi (12, s. 60)

Isotermisen prosessin eli lauhtumisprosessin toteuttaminen riittävällä tarkkuudella ei ole käytännössä vaikeaa, sillä vakioaineen säilyttäminen pitää myös lämpötilan vakiona kylläistymispisteessä. Isentrooppisten prosessien toteuttaminen tarkasti ei ole sen sijaan käytännössä mahdollista, koska kohdassa 1 - 2 kostean höyryn sijasta puristetaan kuivaa höyryä ja puristus siirtyy tulistuneen puolelle. Kompessorit eivät mekaani-

sesti kestä määrän höyryn puristusta. Paisunta kohdassa 3 - 4 tehdään kuristusventtiilillä. Ideaalisessa prosessissa se tehtäisiin turbiinilla, mutta pienissä koneistoissa tämä ei ole mahdollista. Kuristamalla tehdystä paisuntatyöstä tulee melko pieni suhteessa puristustyöhön. (7, s. 609.)

Ideaalisen kylmäprosessin (kuva 4) vaiheet (12, s. 60):

- 1 - 2 Isentrooppinen puristus kompressorissa.
- 2 - 3 Tulistuksen jäähdytys.
- 3 - 4 Lauhdutus lauhduttimessa.
- 4 - 5 Mahdollinen alijäähdytys vakiopaineessa.
- 5 - 6 Nesteen kuristus paisuntaventtiilissä, osa nesteestä höyrystyy.
- 6 - 1 Seoksen höyrystyminen kylmäksi höyryksi



Kuva 4. Ideaalinen kylmäprosessi (12, s. 60)



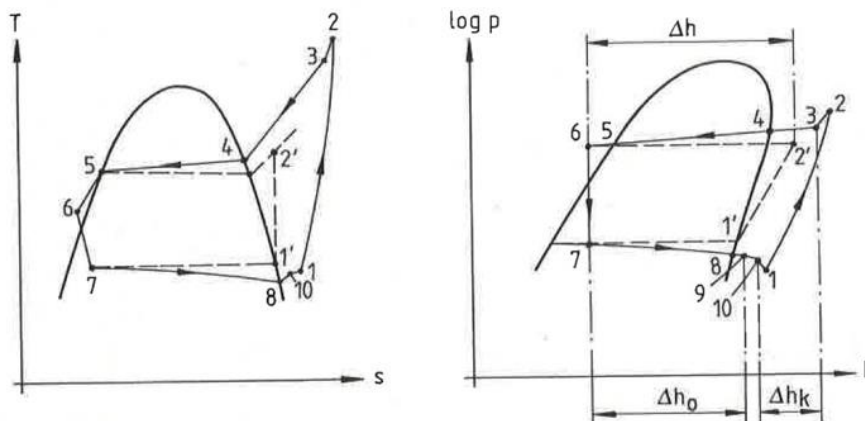
## 5.1 Todellinen prosessi

Höyryprosessi ei toimi koskaan täydellisesti yllämainitun ideaalisen höyryprosessin tavoin. Todellisessa prosessissa syntyy häviöitä, jotka aiheuttavat poikkeamia ideaalisesta prosessista. Näitä ovat seuraavat (12, s. 59):

1. Puristuksessa syntyvät häviöt. Puristus ei ole täysin isentrooppinen, vaan entropia kasvaa. Puristus ei ole myöskään adiabaattinen, sillä kompressorin hukkaa lämpöä ympäristöön.
2. Kompressorin venttiilien painehäviöt.
3. Höyryn lämpeneminen imukanavissa ja imuventtiileissä, sekä jäähtyminen paine-venttiileissä ja painekavissa puristuksen jälkeen.
4. Muut painehäviöt putkistoista, höyrytimistä ja lauhduttimista.

Ideaalisessa syklissä kylmäaine tulee kompressorille kylläisenä höyrynä. Todellisuudessa kylmäaineen olomuotoa ei pystytä hallitsemaan niin täydellisesti (12, s. 59). Laitte suunnitellaan niin, että kylmäaine on varmuudella höyryä sen saavuttaessa kompressorin; siksi se on todellisissa kylmäprosesseissa tulistunutta ennen kompressorin (7, s. 610).

Kuvassa 5 näkyvät todellisen ja ideaalisen prosessin erot terävästi havainnollistettuna. Kuvasta nähdään, miten kylmäaine menee selvästi tulistuneen höyryn alueelle siirtyessään puristukseen ja puristuksen ajaksi kompressorissa. Kuviosta nähdään myös, että todellisessa prosessissa lauhtuminen ja höyrystyminen ei tapahdu täsmällisessä vakioaineessa, eikä puristus ole isentrooppinen.



Kuva 5. Todellisen ja ideaalisen kylmäprosessin erot. Katkoviiva esittää ideaalista prosessia (12, s. 60)

## 5.2 Alijäähtyminen

Kylmälaitoksen kylmäkerrointa voidaan parantaa alijäähdyttämällä nestettä lauhtutuksen jälkeen eli yli kylläisen pisteen. Neste on alijäähtynyt, kun sen lämpötila on matalampi kuin kylläistyslämpötila kylläistyspaineessa. Lauhduttimen jälkeen paine pidetään vakiona, ja neste jäähdyytetään hieman kylläistyslämpötilan alapuolelle. Alijäähdytys voidaan toteuttaa lauhduttimessa tai erillisellä lämmönsiirtimellä jäähdyyttäen vedellä tai ilmalla. (12, s. 70.)

## 5.3 Jäähdytinprosessin laskeminen

Todellinen prosessi lasketaan jäähdyttimestä tarkastelemalla kylmäaineen lämpötiloja, paineita ja massavirtaa eri kohdissa koneistoa; ennen ja jälkeen kompressorin, lauhduttimen jälkeen, kuristuksen jälkeen. Todellisessa prosessissa pitää huomioida edellisessä alaluvussa mainitut lämpöhäviöt ympäristöön ja painehäviöt kompressorissa sekä putkien päätepisteiden välillä. Lähelle todellista prosessia päästään mittaamalla lämpötila- ja painearvoja sisäisestä kierrosta. Faasien olomuodot, paineet ja lämpötilat

tietäen voimme määrittää kylmäkoneen kylmätehon ja hyötysuhteen sekä eri komponenttien tekemän työn. (7, s. 614.)

Kylmäkoneen toimintaa ilmaisee *coefficient of performance*, eli  $COP_r$  -arvo, joka on tehdyn kompressorityön eli puristustyön suhde tuotettuun kylmään eli höyrystimien kylmätehoon. (7, s. 609.)

(14)

$$COP_r = \frac{Q_l}{W_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$h_1$  entalpia tulistuksen jälkeen [kJ/kg]

$h_2$  entalpia kompressorityön jälkeen [kJ/kg]

$h_4$  entalpia paisuntaventtiilin jälkeen [kJ/kg]

Jossa  $h_4$  on entalpia (kaava 2) kuristusventtiilin jälkeen,  $h_1$  on entalpia tulistimien jälkeen ennen kompressoria ja,  $h_2$  on entalpia kompressorin jälkeen.

Toinen tärkeä kylmäkoneen toimintakykyä mittaava suure on isentrooppinen hyötysuhde, jossa verrataan häviötöntä kompressorityötä toteutuneeseen kompressorityöhön. Isentrooppinen puristustyö on ideaalinen puristustyö, jossa entropia ei kasva eli kompressori ei ideaalisessa työssä käytä energiaa tilanmuuttumiseen. (7, s. 615.)

(15)

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

$h_{2s}$  isentrooppinen entalpia [kJ/kg]

Eri komponenttien tekemät työt lasketaan vastaavasti massavirtaa ja entalpia-arvoja käyttäen. (kaava 9.)

Höyrystimen kylmän tuotto,

$$\dot{Q}_l = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

kompressorin tekemä työ,

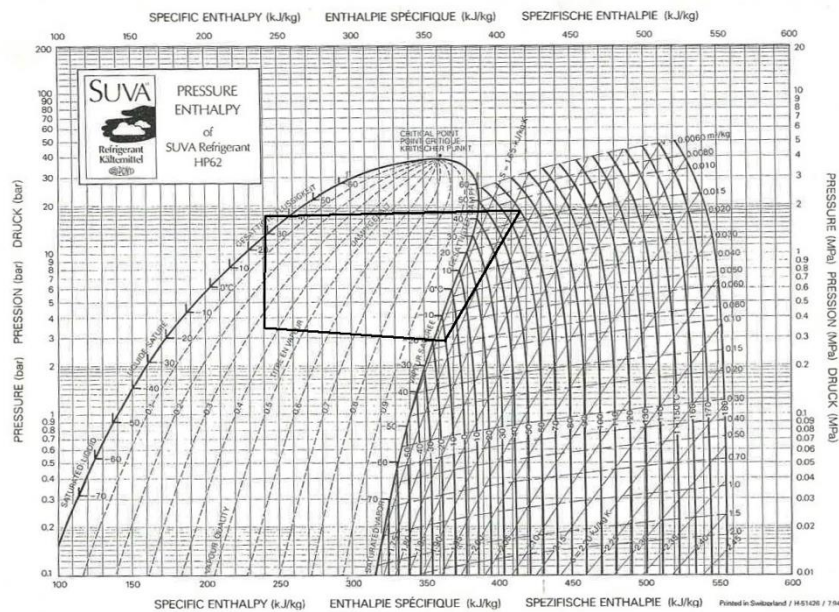
$$\dot{W}_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

lauhduttimen lauhdutusteho.

$$\dot{Q}_w = \dot{m}(h_2 - h_4)$$

## Taulukkojen ja piirrosten käyttäminen

Kylmäkoneita tarkastellessa kylmäprosessin kuvaaja piirretään log p,h -diagrammiin (kuva 6), josta nähdään kutakin faasiolomuotoa vastaava entropia-arvo. Toinen hyödyllinen työkalu prosessia havainnollistaessa on t,s -piirros, joka kuvaa lämpötilan suhdetta entropiaan. Faasien muutokset riippuvat kylmäaineiden ominaisuuksista, joten jokaiselle kylmäaineelle on omat piirroksensa. Tarkempia arvoja määritetään kylmäaineille myös kylmäaineen ominaisuuksia erittelevistä taulukoista. Kunkin kylmäaineen faasi-muutoksia kuvaavat diagrammit ja taulukot määritetään kokeellisesti, joten niille ei ole mitään yksiselitteistä kaiken kattavaa laskukaavaa. Vaativampia laskuja tehdään usein tietokoneella, sillä kylmäprosessin mallintamiseen erikoistuneet ohjelmat valitsevat lähtöarvoja vastaavat laskenta-arvot automaattisesti.



Kuva 6. Jäähdytysaine R404A:N log p,h -piirros esimerkkiprosessilla, jossa oletettu todellisessa prosessissa tapahtuva kylläisen pisteen ylitse menevä tulistuminen ennen kompressorityötä. Lisäksi alijäähtyminen lauhtuttimen jälkeen. (Liite 1.)

## 6 Kylmäaineet

Kylmäaine on kylmäkoneistossa lämmönsiirtoaineena toimiva nesteytetty kaasu. Aineen soveltuvuutta kylmäaineeksi määrittää sen kyky muuttaa olomuotoa nestemäisestä kaasuksi ottaessaan vastaan lämpöä tai kaasumaisesta nesteeksi luovuttaessaan lämpöä ympäristöönsä. Olomuodonmuutosta apuna käyttäen kylmäaineella voidaan siirtää suuriakin lämpökuormia melko pienellä kylmäaineen massavirralla. Kylmäaineen - kuten minkä tahansa aineen - olomuodonmuutokset riippuvat vahvasti paineesta ja lämpötilasta. (1, s. 31.)

### 6.1 Hyvän kylmäaineen ominaisuudet

Termodynaamisilta ominaisuuksiltaan hyvän kylmäaineen ominaisuuksia voidaan hyvin esittää taulukossa, joka kertoo ominaisuuksien avulla saavutettavan hyödyn. Taulukossa 1 esitetään kylmäaineen ominaisuuksien mukana tulleet hyödyt. Taulukossa 2 esitetään hyvän kylmäaineen kemialliset ominaisuudet.

Taulukko 1. Termodynaamisilta ominaisuuksiltaan hyvän kylmäaineen ominaisuudet

Ominaisuus	Saavutettava hyöty
suuri höyrystymislämpö	pieni massavirta, pieni kompressorin koko, pieni putkikoko
pieni kompressorin painesuhde (korkea-paine/matalapaine)	pieni puristustyö, vähäinen tulistuminen puristuksessa
pieni viskositeetti	painehäviöt venttiileissä ja putkistoissa pienet
hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet	pieni lämmönsiirtopinta-alan tarve
suuri tilavuustuotto	kompressorin pieni koko
höyrystymispaine yli 1 bar	mahdolliset vuodot, ilman ja kosteuden kulun estyminen

Taulukko 2. Hyvän kylmäaineen kemialliset ominaisuudet

Ominaisuus	Saavutettava hyöty
stabiilius	suuri käyttölämpötila- alue
ei- aktiivinen reagointikyky	hyvä käytettävyys eri materiaalien kanssa
palamattomuus	käytön turvallisuus
liukenevuus käytettävään öljyyn	hyvä öljynpalautuminen kompressorille

Tiukentuvat ympäristömääräykset ja yleinen tietoisuus ilmakehälle haitallisista kylmäaineista on tuonut mittavaa kiinnostusta ympäristöystävällisempään tuotekehittelyyn. Kylmäaineen ympäristöystävällisyyttä kuvaa ODP-luku (Ozone Depletion Potential). Se ilmoittaa kylmäaineen suhteellisen haitallisuuden käyttäen referenssiaineena kylmäainetta R11, asettaen sen haitallisuusarvoksi 1,0. Toinen kylmäaineita koskeva tunnusluku on GWP-arvo, joka kertoo kylmäaineen kasvihuonehaitallisuuden (Global Warming Potential). GWP-arvoa verrataan hiilidioksidin haitallisuuslukuun, jonka arvo on 1,0. Lasketut GWP-arvot ilmoitetaan yleensä 100 vuoden ajanjaksolle. Mitä suurempia edellä mainitut tunnusluvut ovat, sitä haitallisempia kylmäaineet ovat ilmakehään päästessään. Uusissa kylmälaitoksissa edellä mainittu ODP-luku on 0, eli ne eivät sisällä yleensä otsonille haitallisia kylmäaineita, vaikka niiden hiilidioksidipäästöt ovat edelleen haitallisia. (1, s. 32.)

## 6.2 Kylmäaineiden jaottelu

Kylmäaineen valinta tehdään aina kulloisenkin käyttötarpeen mukaan. Sen valinta on kompromissi, sillä yksikään kylmäaine ei voi vastata täydellisesti tiettyä monista vaatimuksista koostuvaa käyttötarvetta. Kylmäaineet jaotellaan joko höyrystymis- ja lauhtumiskäyttötymisen mukaan tai kemiallisen koostumuksen mukaan. Kemiallisen koostumuksen mukaan jaotelleessa tarkastellaan kylmäaineen halogeenimolekyylien määrää, koska suurin osa kylmäaineista on halogeenimolekyyleillä prosessoituja hiilivetyjä. Lisäksi on olemassa ns. luonnonmukaisia kylmäaineita, jotka eivät sisällä lainkaan halogeenimolekyylejä. Luonnonmukaisiksi kylmäaineiksi luetaan puhtaat hiilivedyt, ammoniakki ja hiilidioksidi. Nämä kylmäaineet esiintyvät luonnossa samassa muodossa eivätkä tuota haittaa ilmakehän otsonikerrokselle tai lisää kasvihuoneilmiötä. (1, s. 32.)

Halogeenihiilivedyt ovat kuitenkin haitallisia ilmakehälle, ja niiden käyttöä on rajoitettu lainsäädännöllisesti runsaasti viime vuosina. Luonnonmukaisille kylmäaineille ei ole halogeenihiilivedyille tyypillisiä rajoituksia, tosin suurin osa niistä on erittäin syttymis-herkkiä ensimmäisen luokan palavia nesteitä, joten niitä kylmäaineena käyttävät kylmä-laitokset asettavat suunnittelijoille monia haasteita. (1, s. 36.)

Ammoniakin käyttö vaatii kylmälaitokselta hieman erilaista teknologiaa perinteiseen kylmäkoneistoon verrattuna. Ammoniakilla on erittäin korkea isentrooppinen ekspon-entti. Kompressorin puristuksen loppulämpötila nousee erittäin korkeaksi, vaikka höy-rystymislämpötila on alhainen. Teollisissa sovelluksissa ammoniakkaa on käytetty jo vuosia käyttäen mineraaliöljyä voiteluaineena. Mineraaliöljyn olosuhteet heikkenevät kuitenkin ääriolosuhteissa, siksi vaativimmissa tapauksissa on päädytty synteettisiin P-tyypin öljyihin. Poikkeavan voiteluöljyn lisäksi ammoniakki-kylmälaitokset vaativat te-räsputkiston kuparissa tapahtuvan korroosion takia. Monen muun muutoksen ohella, voidaan todeta, että ammoniakki ei sovellu suoraan minkään yleisesti käytetyn kylmä-aineen korvikkeeksi. (8, s. 25.)

Kylmäaineiden nimikkeitä halogeenimolekyylien mukaan (1, s. 35):

- CFC-kylmäaineet. Täysin halogenoituja hiilivetyjä, jotka eivät sisällä lainkaan vetyä. Sisältävät klooria, fluoria ja hiiltä. Suuri otsonihaitallisuus ja merkittävä kasvihuonehaitallisuus. CFC-aineiden käyttö on kiellettyä kylmälaitoksissa ja niiden huollossa.
- HCFC-kylmäaineet. Osaksi halogenoituja hiilivetyjä. Sisältävät klooria, fluoria, hiiltä ja vetyä. Otsonihaitallisuus on pieni, mutta kasvihuonehaitallisuus on mer-kittävä. HCFC-aineet ovat kielletty uusissa kylmälaitoksissa. Uusissa kylmälai-toksissa HCFC-aineita saa käyttää vuoteen 2010 asti ja sen jälkeen talteen otettua ainetta vuoteen 2015 asti.
- HFC-kylmäaineet. Osaksi halogenoituja hiilivetyjä. Sisältävät fluoria, hiiltä ja vetyä. Otsonihaitattomia, mutta kasvihuonehaitallisuus on merkittävä. HFC-aineet ovat suurimmaksi osaksi korvanneet CFC- ja HCFC-aineet kylmälaitok-sissa. Aineet ovat ongelmajätettä. Jätteen sijoitus ja käsittely on huomioitava huoltotoimenpiteissä.

- PCF-kylmäaineet. Täysin halogeenittomia hiilivetyjä. Sisältävät fluoria ja hiiltä. Otsonihaitattomia, mutta kasvihuonehaitallisuus on merkittävä.

### 6.3 Jaottelu höyrystymis- ja lauhtumiskäyttäytymisen mukaan

Kylmäaineet jaetaan höyrystymis- ja lauhtumiskäyttäytymisen mukaan kolmeen ryhmään riippuen kylmäaineen komponenttien määrästä. Komponenttien määrä määrittelee, tapahtuuko höyrystymisen ja lauhtumisen aikana lämpötilan muutosta. Nämä kolme ryhmää ovat yksikomponenttiset, atseotrooppiset ja tseotrooppiset kylmäaineet (1, s. 33):

- Yksikomponenttinen kylmäaine koostuu vain yhdestä aineesta, ja sen höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuu vakio­lämpötilassa.
- Atseotrooppinen kylmäaine on kahden tai useamman kylmäaineen seos, jolla myös höyrystyminen ja lauhtuminen tapahtuu vakio­lämpötilassa. Atseotrooppisten kylmäaineiden tunnus alkaa numerolla 5, esim. R507A.
- Tseotrooppiset kylmäaineet koostuvat kahdesta tai useammasta yksikomponenttisestä kylmäaineesta, ja niiden höyrystymisen ja lauhtumisen aikana tapahtuu lämpötilan muutos. Tseotrooppisten kylmäaineiden tunnus alkaa numerolla 4, esim R404A.



## 7 Jäähdytystehon tarve

Kylmälaitosta mitoittaessa arvioidaan sen jäähdytystehon tarve. Tässä työssä pyritään samalla toimenpiteellä arvioimaan jo olemassa olevan kylmäkoneen jäähdytystehon toteutumista ja jakautumista eri komponenttien kesken. Elintarvikkeiden jäähdytykseen soveltuvan kylmälaitoksen jäähdytyksen tarve koostuu tavallisesti seuraavista osatekijöistä:

1. Seinämien kautta tapahtuvat lämpöhäviöt.
2. Ilman kosteuden tuoma lämpömäärä sen tiivistyessä vedeksi.
3. Tuotteiden jäähdytys tarvittavaan lämpötilaan.
4. Tuotteiden hengityslämmön aiheuttama lämpö.
5. Puhaltimien ja kylmäliuospumppujen tekemää mekaanista työtä vastaava lämpömäärä.
6. Kylmälaitoksen valaistuksen aiheuttama lämpömäärä.
7. Höyrystimen päälle kerääntyvän huurteen sulatukseen käytetty lämpömäärä.

Jäähdytystarvetta voidaan arvioida yksityiskohtaisemmilla osatekijöillä, riippuen kylmälaitoksesta, mutta edellä mainitut tekijät muodostavat olennaisimman kokonaisuuden tehontarvetta arvioidessa. (15, s. 307.)

### 7.1 Seinämien kautta tapahtuvat lämpöhäviöt

Lämpöhäviöt seinämästä määräytyvät seinämän lämmönjohtumisominaisuuksien mukaan. Seinämän eristyskykyä mitataan lämmönläpäisykertoimella,  $k$ , joka lasketaan seinämän aiheuttaman kokonaisvastuksen,  $M$ , perusteella. Seinämän koostuessa – kuten tavallisesti – monesta kerroksesta, saadaan kokonaislämpövastus laskemalla jokaisen homogeenisen kerroksen lämpövastus kaavasta (15, s. 104):

(16)

$$m = \frac{L}{\lambda}$$

$m$  lämpövastus [ $m^2K/W$ ]

$L$  kerroksen paksuus [ $m$ ]

$\lambda$  lämmönjohtavuus [ $W/Km$ ]

Kaavassa esiintyvä lämmönjohtavuus,  $\lambda$ , on kokeellisesti mitattava suure, joka vaihtelee eri materiaalien välillä. Tiedettäessä jokaisen kerroksen lämpövastus, voidaan seinämän kokonaislämpövastus laskea laskemalla lämpövastukset yhteen (15, s. 104):

(17)

$$M = m_1 + m_2 + \sum m$$

Tämän jälkeen lasketaan lämmönläpäisykerroin,  $k$ , kokonaislämpövastuksen perusteella. Lämmönläpäisykerroin on kokonaislämpövastuksen käänteisluku (15, s. 103):

(18)

$$k = \frac{1}{M}$$

$k$  lämmönläpäisykerroin [ $W/Km^2$ ]

Kylmäkoneen ulkopuolelta tulevan lämpövirran suuruuteen vaikuttavat siis lämmöneristyksen lämmönläpäisykerroin,  $k$ , seinämien pinta-ala,  $A$ , sekä lämpötilaero seinämien molemmilta puolilta,  $\Delta t$ . (16, s. 309.)

(19)

$$\phi_{seinämät} = k \cdot A \cdot \Delta t$$

Laskiessa lämpöhäviöitä kylmätilan ulkoseinämiltä tarvitaan lisäksi lämmönsiirtymiskerroin. Lämmönsiirtymiskertoimen suuruus on riippuvainen lämpötilasta seinämien molemmilla puolilla, virtaavan ilman nopeudesta pinnalla ja rajapinnan muodosta sekä rakenteesta. Lämmönsiirtymiskerroin kuvaa konvektion avulla siirtyvää lämpöä. Sille käytetään tavallisesti seuraavia valmiita arvoja (15, s. 101):

(20)

Seinämien ulkopuolella:

$$\alpha_0 = 30 \text{ W/Km}^2$$

Seinämien sisäpuolella:

$$\alpha_1 = 10 \text{ W/Km}^2$$

## 7.2 Ilman kosteuden tuoma lämpömäärä

Ilman jäähtyöksessä tulee huomioida ilman kuivuminen eli kosteuden tiivistyminen kylmälaitteen sisällä ja jäähtytyspatterin pinnoilla. Veden tiivistymiseen tarvittavaa lämpömäärää kutsutaan latentiksi lämmöksi. Tiivistymistä tapahtuu kylmäkoneistossa monella eri tavalla. Tiivistymistä tapahtuu suhteellisen kosteuden muuttuessa ilman lämpötilan vaikutuksesta. Kylmä ilma ei kykene pitämään kosteutta sisällään, vaan se tiivistyy vedeksi. Kylmäkoneiston kosteus muuttuu myös koneiston ulkopuolisen ilman vaikutuksesta. Koneiston sisällä tapahtuu kosteuden tiivistymistä, kun sisällä olevat tuotteet luovuttavat kosteutta ilmaan, joka tiivistyy eri puolille koneistoa, esimerkiksi höyrystimen pinnoille. (2, s. 200.)

Ilmastoinnin perusprosesseja havainnollistetaan kostean ilman Mollier-piirroksella. Näitä prosesseja ovat esimerkiksi ilmavirtojen sekoittuminen, ilman lämmitys, kostutus ja jäähtyys. Piirroksesta voidaan selvittää lämpötiloja vastaavat suhteelliset kosteudet ja entalpiat. Kylmäkoneistojen mitoituksessa kosteuden tiivistyminen jätetään joskus huomioimatta, mikä johtaa siihen, että koneisto on alimitoitettu. (2, s. 200.)

Mollier-diagrammia käyttämällä tarvittava jäähtytysteho saadaan kaavasta:

(21)

$$\phi = \rho \cdot q_v \cdot (h_1 - h_2)$$

$\rho$  ilman tiheys [ $kg/m^3$ ]  
 $q_v$  ilmavirta [ $m^3/s$ ]  
 $h_1$  ilman alkumentalpia [ $kJ/kg$ ]  
 $h_2$  ilman loppumentalpia [ $kJ/kg$ ]

Näillä arvoilla saadaan kokonaisjäähtytysteho, joka sisältää sekä tuntevan jäähtytystehon että ilman kuivaamiseen tarvittavan tehon. Tuntuva jäähtytysteho on teho, joka tarvitaan ilman lämmittämiseen alkulämpötilasta loppulämpötilaan. Mollier-diagrammi mahdollistaa molempien tehojen tarkastelun. Diagrammin lukemista varten tarvitaan märkälämpömittari tai suhteellista kosteutta mittaava mittari.

### 7.3 Tuotteiden jäähdtyksen vaatima lämpöteho ja hengityslämmön teho

Varastoitavien tuotteiden jäähdtystarvetta arvioitiin jo ruokien ominaislämpöjä ja lämpötehoa tarkastellessa. Jäähdtyksessä vaadittava lämpöteho selvitetään, kun tiedetään tavaran paino, alku- ja loppulämpötila, ominaislämpö ja jäähdtykseen käytettävä aika. Nämä arvot sijoitetaan aiemmin mainittuun kaavaan (kaava 9) (9, s. 37):

(22)

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{tuotteet}} &= \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}c_p\Delta h \\ \dot{m} &\text{ massavirta [kg/s]} \\ \Delta T &\text{ lämpötilamuutos [K] tai [}^\circ\text{C]} \\ \Delta h &\text{ entalpiamuutos [J/K] tai [}^\circ\text{C/K]} \end{aligned}$$

Yhtälö esiintyy tehomuodossa, kun massan sijasta käytetään massavirtaa. Jäähdtystapahtumassa massavirta voidaan ajatella lämpönä, joka siirtyy jäähdtyttävästä tuotteesta. Se saadaan selvitettyä, kun tuotteen massa jaetaan sen jäähdtyttämiseen kulu- neella ajalla. (9, s. 37.)

Siirryttäessä jäätymispisteen alapuolelle, tapahtuu tuotteen nestemäisessä osassa olomuodonmuutos eli jäätyminen, jonka seurauksena piilevä latentti lämpö vapautuu. Siebelin kaavan yhteydessä tarkasteltiin, miten elintarvikkeiden latentit lämmöt muodostuvat karrikoidusti. Latentin lämmön vapautumisen seurauksena muodostuva lämpömäärä saadaan selville, kun tiedetään, kuinka paljon höyryä tuote luovuttaa. Käytännön ratkaisu tähän on tuotteen punnitseminen ennen ja jälkeen jäähdtyksen. Tuote luovuttaa veden lisäksi muitakin kaasuja, mutta voidaan olettaa haihtuvan aineen sisältävän suurimmaksi osaksi vesihöyryä. (9, s. 37.)

Monissa julkaisuissa esitetään valmiita hengityslämpöjä. Hengityslämpö on arvo joka kuvaa tuotteen luovuttamaa latenttilämpöä kilogrammaa kohti tietyssä ajassa. Hengityslämpö voidaan myös laskea kokeellisesti, kun tiedetään tuotteen latenttilämpö (9, s. 37):

(23)

$$\begin{aligned} \phi_{\text{latent}} &= \dot{m}h_{\text{latent}} \\ \dot{m} &\text{ tuotteen menettämä neste jäähdtyksen aikana [kg/s]} \\ h_{\text{latent}} &\text{ veden latenttilämpö [kJ/kg]} \end{aligned}$$

#### 7.4 Koneiston aiheuttama lämmön lisäys

Koneistoon kytkeytyvät laitteet tuovat lämpöä jäähdytettäviin tiloihin. Osa laitteista on mekaanisia, osassa sähköenergia muuttuu lämmöksi. Tällaisia laitteita ovat puhaltimet ja höyrystimille muodostuvan huurteen sulatuslaitteet. Puhaltimien kuormitusta arvioidessa käytetään laskelmissa tavallisesti sähkömoottorin kilpeen leimattua moottorin nimellistehoa. Puhaltimien aiheuttama kuormituksen lisäys on varsin merkittävä etenkin pienemmissä laitoksissa. Tämän kuormituksen lisäyksen takia kylmälaitosta suunniteltaessa puhaltimia ei tulisi ylimitoittaa. (15, s. 321.)

Höyrystimien pinnalle muodostuvan huurteen sulatukseen käytetään yleensä sähköisiä lämpösauvoja, joiden lukumäärä ja tehonotto määrätään siten, että ne ovat sopivassa suhteessa höyrystimien kokoon. Lämpösauvat kytketään päälle automaattisesti tarkastelemassamme pikajäähdyttimessä digitaalisen logiikan mukaan, höyrystimen lämpötilatietoja käyttäen. (15, s. 321.)

#### 7.5 Tehontarve

Kokonaistehontarve on eriteltyjen osatekijöiden summa. Riippuen jäähdytystavasta ja komponenttien määrästä se voidaan esittää kaavalla (9, s. 37.):

$$\phi_{kok} = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_n$$

$\phi_{kok}$  kokonaislämmöntarve [W]

(24)

## 8 Mittaustoimenpiteet

### 8.1 Mittausten runko

Pikajäähdytintä koskevat mittaukset toteutetaan periaatteellisesti kahdella eri tavalla: koneen sisäistä prosessia mitaten ja koneen toteuttamaa käytännön prosessia mitaten. Koneen sisäinen prosessi kertoo, mikä on koneen eri komponenttien – höyrystimen, kompressorin ja lauhduttimen – teho. Koneessa toteutuva prosessi kertoo, miten paljon tästä prosessista käytetään kylmän aikaansaamiseksi.

Sisäisen prosessin mittaukset saadaan mittaamalla lämpötilatietoja eripuolilta koneistoja elektronisella lämpömittarilla putkien pintalämpötiloista. Jäähdytystehon tarve arvioidaan lämmitettävän ruoan vaatimasta ominaislämmöstä, tiivistyvän veden määrästä, tuulettimien tehosta sekä sisä- ja ulkoilman lämpötilaerosta. Tuotetta jäähdytetään neljän tunnin ajan noin 60 °C:sta siihen lämpötilaan, johon pikajäähdyttimen kapasiteetti kykenee jäähdyttämään. Tällä verrataan testin tuloksia ensimmäisessä luvussa eriteltyihin standardeihin.

### 8.2 Jäähdytettävät tuotteet

Jäähdytystehoa arvioitiin kahdella kuormalla. Ensimmäisessä jäähdytyskerrassa jäähdytettiin 37,5 kg sahajauho- glykoliseosta, jossa oli 80 % sahajauhoa ja 20 % glykolia. Toisessa jäähdytyskerrassa jäähdytettiin 55 kg sahajauho- glykoliseosta, jossa oli 80 % sahajauhoa ja 20 % glykolia. Seostyyppi sopi testikokeeseen, sillä sitä oli aikataulun huomioiden nopeasti saatavilla suurin määrin. Matalan jäätymispisteen glykolin tarkoitus oli estää sahajauhoa jäätymästä pinnalta jolloin sahajauho toimi enemmän keskimääräisen ruoan tavoin. Lisäksi se esti huokoisen ominaislämmöltään matalan sahajauhon jäähtymisen liian nopeasti. Riippuen alkuperästänsä sahajauho voi olla erittäin kosteaa tai erittäin kuivaa. Testissä käytetty sahajauho oli testin tulokset huomioiden erittäin kuivaa, mistä voidaan päätellä, että se ei sovellu approksimoimaan keskimääräisen lämpimän ruoan ominaisuuksia. Ruoan ominaislämmön määrittää suurimmaksi osaksi sen vesipitoisuus, joka on monissa ruoissa suhteellisen korkea verrattuna sahajauhon vesipitoisuuteen.

Sahajauho- glykoliseos laitettiin kymmeneen GN -malliseen astiaan, jotka siirrettiin pikajähdyttimen sisään niille valmistetussa telineessä. GN, eli gastronorm, on ravintolakeittiöissä käytetty standardikokojen säännöstö ruoanlaitossa. Testissä käytetty astia oli GN 2/1. Se on gastronorm astioista suurin, pinta alaltaan 650x530 mm<sup>2</sup> ja 100 mm syvä. Astia on valmistettu ruostumattomasta teräksestä.

### 8.3 Mittalaitteet

Prosessimittauksessa käytettiin Testo 435 -yleismittaria (kuva 7). Mittarilla voidaan mitata lämpötilaa, kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta ja absoluuttista painetta samanaikaisesti. Mittari voidaan kytkeä myös siipipyöranemometriin, jolla mitataan ilman virtausnopeutta. Lämpötilamittarilla voidaan mitata samanaikaisesti ilman suhteellista kosteutta. Testeissä käytettiin enimmäkseen K-tyyppin lämpötila-anturia (kuva 8). Anturi on termopari, jonka mittaustulos perustuu kahden eri metallin liitoksessa syntyvään lämpötilasta riippuvaan jännitteeseen. K-tyyppi merkitsee sitä, että parin muodostavat nikkelin ja kromin seos.



Kuva 7. Testo 435 -yleismittari

Testo 435 -yleismittarilla voidaan mitata myös ilman suhteellista kosteutta. Lämpötila-anturin yhteydessä on hygrometri, joka absorboi kosteutta ilman kosteuden mukaan. Hygrometri määrittää suhteellisen kosteuden sähköisesti absorboituneen kosteuden aiheuttaneen potentiaalieron mukaan.



Kuva 8. Mittariin kiinnitettävä k-tyypin lämpötila-anturi hygrometrisillä ominaisuuksilla

Ilman kosteuden mittauksessa käytettiin myös kostea ja kuiva mittaria. Kosteaa mittaria on tavanomainen mittari, jonka anturiosan ympärille on sidottu kostea kangas, eli sukka. Sukan tulee olla kasteltu tislattulla vedellä. Mittarin lämpötila laskee sukassa olevan veden haihtuessa, sillä haihtumiseen tarvittava energia on peräisin mittarin lämpöenergiasta. Ilman kosteudesta riippuva veden höyrystymisen nopeus on suoraan verrannollinen tarvittavan energian määrään. Ilman kosteus voidaan siis määrittää, kun tiedetään kuivan ja kostean lämpömittarin lukema.

Jäähdytettävien tuotteiden sisälämpötilan, koehuoneen ilmankosteuden, tuulettimiin menevän ilmankosteuden ja kabinetin sisäilman lämpötilan mittaukseen käytettiin Graphtec GL800-dataloggeria (kuva 9). Se on digitaalinen mitta-asema, joka nauhoittaa mittatietoa, tallentaen tietoa käyttäjän valitsemassa aikajaksossa. Loggeriin voidaan kytkeä 20 anturia yhtäaikaisesti. Lämpötilatietoja mitattiin testissä loggeriin kytke-tyillä termopari-antureilla. Koehuoneen sisälämpötilaa mitattiin hygrometrillä. Graphtec GL800-dataloggerin näytöltä voi seurata lämpötilatietoja numeroina ja graafeina. Nauhoitusominaisuuden avulla tietoja voidaan tarkastella Graphtecin omalla ohjelmalla, tai taulukkotietoina CVS-tiedostona, testin jälkeen.

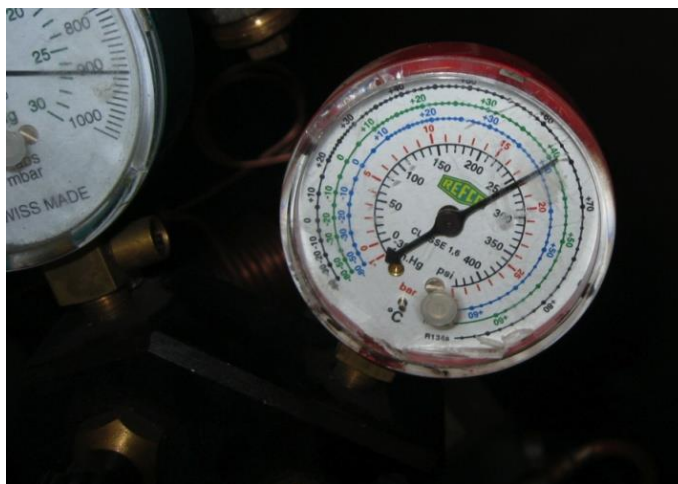




Kuva 9. GL800-mitta-asema

Pikajäähdyttimen sisäisiä tietoja voi seurata myös koneeseen asennettujen lämpötila-antureiden avulla. Koneeseen on asetettu termopareja mittaamaan kaikkien kuuden höyrystimen, jäähdyttimen sisäilman sekä ruoan lämpötila-anturin arvoja. Tietoja käytetään logiikan ohjaukseen.

Pikajäähdyttimen toimintaa seurataan ja säädetään käyttäen apuna painemittareita. Tärkeimmät näistä mittaavat lauhdutinpainetta ja höyrystinpainetta. Näitä kutsutaan kylmätekniikassa huoltomittarisarjaksi. Painemittarit (kuva 10) näyttävät ylipainetta barina asettaen normaalin ilmakehän paineen kohtaan 0 bar. Koska kylmäaineen käyttäytyminen riippuu paineesta, on yleensä painemittareissa kylmäasteikko, joka näyttää kulloistakin painetta vastaavan kylläisen lämpötilan tietylle kylmäaineelle. Tässä kylmälaitoksessa toiminta-alue oli lauhtumislämpötilassa 40 °C ja höyrystyslämpötilassa -15 °C. Näitä arvoja vastaavat paineet ovat 17 bar korkean paineen puolella ja 3,5 bar matalan paineen puolella.



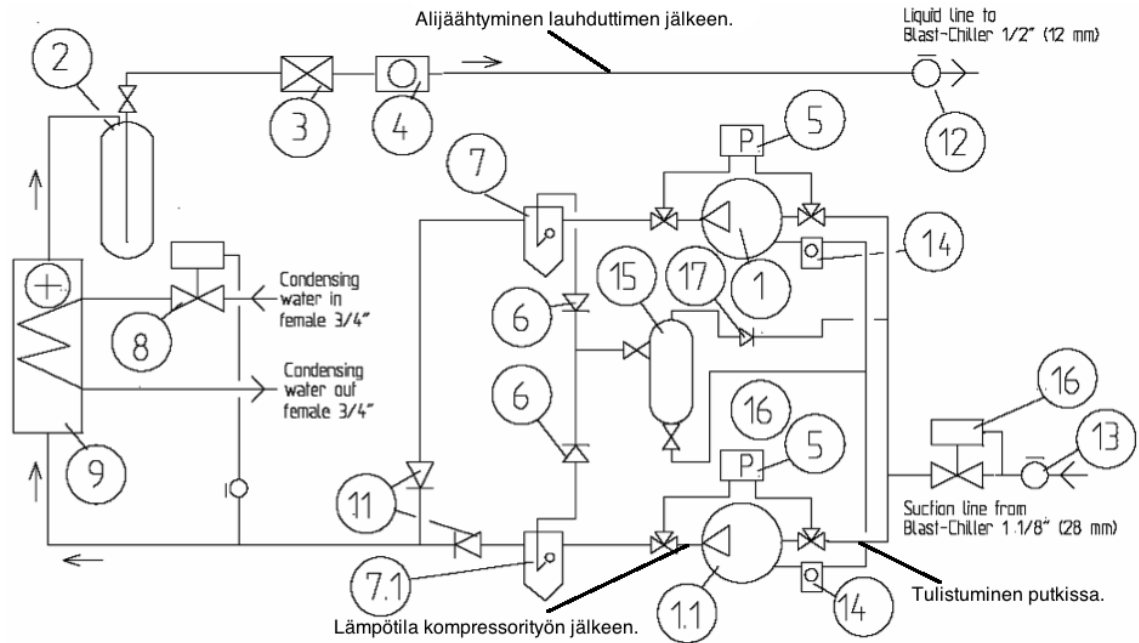
Kuva 10. Pikajäähdyttimen painemittari, josta voi katsoa punaisesta sisärenkaasta paineen ja ulkorenkaasta kulloistakin kylmäainetta vastaavan kylläisen lämpötilan

Erilaisten mittareiden lisäksi testeissä käytetään nollapisteen säädöllä varustettua elektronista vaakaa jäähdyttimen sisään laitettavien tuotteiden massan mittaamiseen.

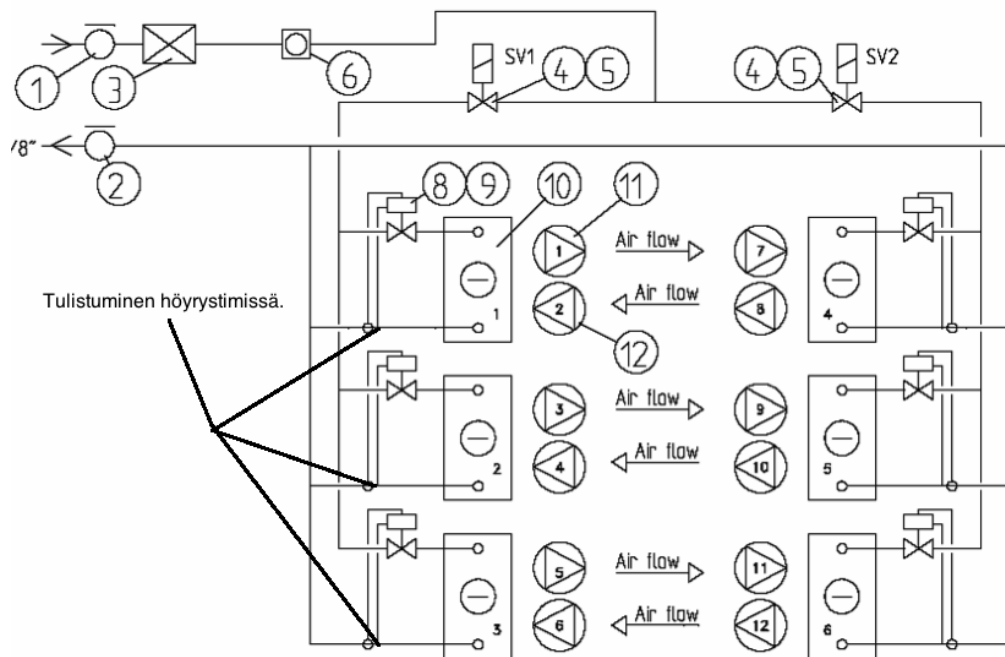
#### 8.4 Sisäisen prosessin mittaustoimenpiteet

Höyryprosessiosiossa käsiteltiin entalpiaa ja aineiden ominaislämpöjä. Näitä arvoja –tai niiden tilapisteitä – voidaan mitata kylmäkoneistossa esimerkiksi putken pintalämpötiloja mitaten. Todellisuudessa putken sisällä virtaavan kylmäaineen lämpötila ei ole täysin sama kuin putken pinnalla, mutta laitteen toimintaa arvioidessa – huollon ja korjauksen kannalta – prosessiarvoja voi mitata jopa sormella tunnustellen. Jos esimerkiksi kompressorista ulos tulevasta paluuputkesta voi pitää käsin kiinni, eli se on kylmä prosessin toiminta-arvot huomioiden, voidaan olettaa että toiminnassa on vikaa.

Kylmäprosessissa mitataan kylmäaineen tulumislämpötila höyrystimissä ennen kompressoria, alijäähtymislämpötila lauhduttimen jälkeen sekä kompressorin puristuksen jälkeinen lämpötila kompressorin paluuputkessa. Kuvassa 11 ja 12 esitetään lämpötilojen mittauspisteet yksinkertaistetussa prosessikaaviossa.



Kuva 11. Pikajäähdyttimen kylmäkaavio mittauspisteiden kanssa



Kuva 12. Höyrystimien jälkeisen kylmäaineen tulistumisen mittauspisteet

Prosessin arvoja mitattiin Testo 435 -yleismittarilla esitetystä pisteistä prosessin aikana. Lisäksi höyrystimen jälkeistä tulistusta mitattiin putkista GL800-loggeria apuna käyttäen. Arvoja mitattiin pikajäähdyttimen ollessa täydessä kuormassa, ja ilman kuormaa.

Mittaamalla voitiin todeta, että sisäisen prosessin arvot eivät jäähdysprosessin aikana poikenneet merkittävästi toisistaan.

Entalpia-arvot poimittiin taulukosta ja log p,h -diagrammista niitä vastaavien paine- ja lämpötila-arvojen mukaan. Alijäähtymisen paineena käytettiin lauhdutuspainetta, joka tässä pikajäähdyttimessä oli säädetty kohtaan 17 bar, ja höyrystymisen paineena käytettiin höyrystyspainetta, joka oli säädetty kohtaan 3,5 bar. Nämä painearvot tarkistettiin koneiston painemittareista. Entalpia-arvoja tarkistaessa tulee käyttää varovaisuutta, sillä tietyt diagrammit näyttävät lämpötilat absoluuttisen paineen mukaan, kun taas toiset diagrammit kertovat vain ilmanpaineen yltävän paineen. Isentrooppinen eli häviötön entalpia saatiin taulukosta korkeamman paineen tulistuneen höyryn entalpia-arvojen kohdalta, kun oletettiin tulistumispuoleisen entropian,  $s$ , pysyvän samana. Taulukossa 3 esitetään mittaamalla saadut lämpötilatiedot, ja niitä vastaavat kylmäaineen entalpiat.

Taulukko 3. Mittareista poimittuja lämpötilatietoja, sekä R404A-kylmäaineen vastaavia entalpia-arvoja

	Alijäähtyneen nesteen lämpötila	Tulistuneen kylmäaineen lämpötila putkistossa ennen kompressoria	Tulistuneen kylmäaineen lämpötila heti höyrystimien jälkeen	Kylmäaineen lämpötila kompressorin jälkeen	Isentrooppinen entalpia
Lämpötila	34-36 °C	-1-5 °C	-5-8 °C	68-70 °C	
Entalpia-arvot kJ/kg	254,8	365	-	419,4	395

Edellisten teoriaosuuksien (kaava 14) mukaan:

$$COP_r = \frac{Q_l}{W_{net,in}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{(365 - 254,8) \text{ kJ/kg}}{(419,4 - 365) \text{ kJ/kg}} = 2,03$$

Kompressorin isentrooppinen hyötysuhde (kaava 15):

$$\eta_c = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{(395 - 365) \text{ kJ/kg}}{(419,4 - 365) \text{ kJ/kg}} = 0,55$$

## 8.5 Lauhduttimen teho

Testin ensimmäisestä vaiheesta ei voida päätellä yksittäisten komponenttien tehoja, vaikka energiasisällöt kilogrammaa kylmääainetta kohden voidaan määrittää. Lauhdutin-teho voidaan kuitenkin mitata yksinkertaisella käytännön toimenpiteellä.

Pikajäähdytyn on vesilauhdutteinen, joten veden lämpötila-arvot ja massavirta voidaan määrittää laskemalla paluuvesi ämpäriin. Otetaan aikaa, kunnes ämpäri on tietyssä litramäärässä ja mitataan veden lämpötila tulo- ja paluupuolelta. Näitä arvoja käyttäen määritetään lauhduttimen lämpöteho työn teoriaosuuden tehoa määrittävän kaavan mukaan seuraavasti:

$$Q_{\text{lauhdutin}} = \dot{m}c_p\Delta T = \dot{m}\Delta h$$

*m veden massavirta [kg/s]*  
*ΔT veden lämpötilamuutos [K] tai [°C]*

Ämpäriissä olevan veden eli paluueden lämpötila määritettiin testissä digitaalisella termoparianturilla. Tulovesi mitattiin erikseen Testo 435 -yleismittarilla ja kosketusanturilla. Vesi laskettiin 12 litran muoviämpäriin.

Vesimäärä suhteessa aikaan ei ollut aina sama, sillä pikajäähdyttimen kompressorin kuorma vaihteli testien aikana. Kuorman suureneminen tarkoittaa tarvetta suuremmalle vesimäärälle tai tarvetta kylmemmälle tulovedelle. Tästä syystä mittaus voidaan joko toistaa jäähdytystilassa todella monta kertaa verraten sitä kompressorin keskimääräiseen tehoon tai ottaa kompressorin tehokuma yhtäaikaisesti lauhduttimen testiä tehdessä.

SeaKingin pikajäähdytyn toimii erilaisissa käyntitiloissa kuormasta riippuen. Testissä oli tarkoitus mitata jäähdyttimen jäähdytyskapasiteettia, joten mittaus tehtiin moneen kertaan kompressorin käydessä normaalin jäähdytyskierron ajan. Soveltamalla teoriaosiossa esitettyä lämpötehon kaavaa saatiin lämpöteho laskettua monen mittauksen keskiarvona lämpötehon kaavasta (kaava 8). Taulukko 4 esittää testissä mitatut arvot ja niitä vastaavien laskutoimituksien tulokset.

Taulukko 4. Lauhduksen lämpöteho eri mittauskerroilla

Aika/sec	Massa/kg	Lämpötila sisään/°C	Lämpötila ulos/°C	Lämpöteho/kW	Veden ominaislämpö
65	5	10,9	45,2	11,0287692	4,18 kJ/kg
74	5,8	10,9	45,2	11,2374216	4,18 kJ/kg
90	6	11,9	44,5	9,08453333	4,18 kJ/kg
89	7	11	44,5	11,0135955	4,18 kJ/kg
Keskiarvo				10,5910799	

### 8.6 Kompressorin ja höyrytimen teho

Lämpöteho lauhduksessa on ämpäriin tulevan massavirran mukaan 10,58 kW. Saadusta arvosta voidaan laskea teoreettisesti kylmäaineen massavirta,  $\dot{m}_{\text{kylmäaine}}$ , kun tiedetään entalpiaerot kylmäaineessa,  $\Delta h$ , lauhdutinta ennen ja lauhduksen jälkeen. Asetetaan kylmäaineen tekemä työ yhtä suureksi veden tekemän työn kanssa:

$$Q_{\text{lauhduksen}} = \dot{m}_{\text{vesi}} c_p \Delta T = \dot{m}_{\text{kylmäaine}} \Delta h = 10,58 \text{ kW}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{kylmäaine}} = \frac{\dot{m}_{\text{vesi}} c_p \Delta T}{\Delta h} = \frac{10,58 \text{ kW}}{164,4 \text{ kJ/kg}} \approx 0,064 \text{ kg/s}$$

Kylmäaineen teho kompressorissa on siis:

$$Q_{\text{kompressorin}} = \dot{m}_{\text{kylmäaine}} \Delta h_{\text{kompressorin}} = 0,064 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 54,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 3,48 \text{ kW}$$

Seuraavaksi lasketaan höyrytimen teho sisäisessä kierrossa, koska kylmäaine on suljetussa systeemissä. Höyrytimen teho:

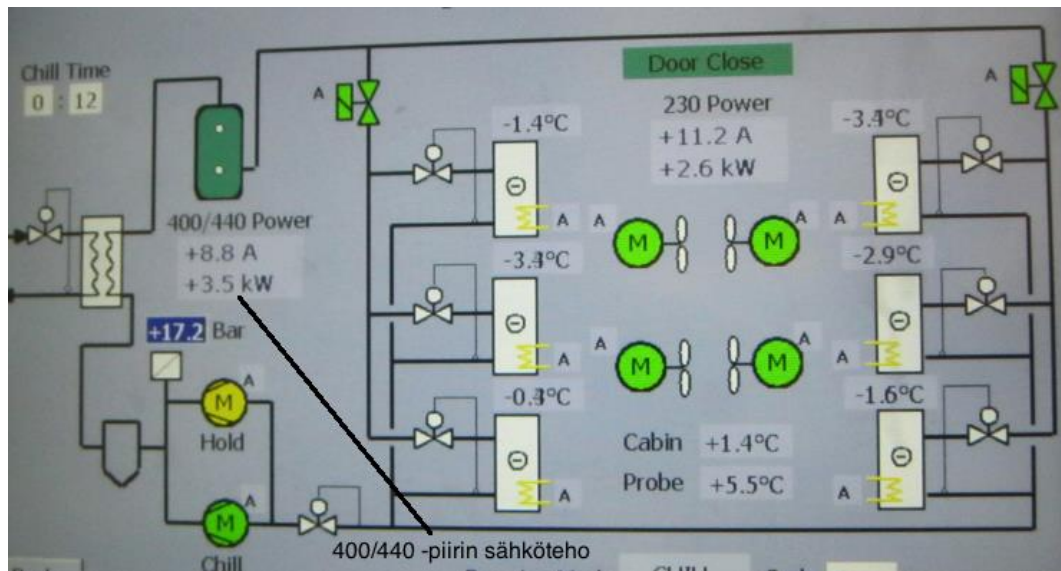
$$Q_{\text{höyrytimen}} = Q_{\text{lauhduksen}} - Q_{\text{kompressorin}} = 10,58 \text{ kW} - 3,48 \text{ kW} \approx 7,1 \text{ kW}$$

Edellisessä luvussa määritetty  $COP_r$ -arvo voidaan nyt laskea vastaavasti:

$$COP_r = \frac{Q_i}{W_{\text{net,in}}} = \frac{7,1 \text{ kW}}{3,48 \text{ kW}} = 2,04$$

Tuloksesta voidaan havainnoida, että  $COP_r$ -arvo ei ole täysin sama, mutta oikealla suuruusalueella. Kompressorin tehoa voidaan myös verrata pikajäähdyttimen logiikan ilmoittamaan sähkötehoon. Kompressorin käynnistyessä logiikka mittaa verkosta otettua sähkötehoa. Tulosta voidaan verrata edellä laskettuun kompressorin tehoon. Teoreettisesti kompressorin sähkötehon tulisi olla suurempi, sillä kompressoria pyörittävä sähkömoottori ei toimita voimaa kompressorille häviöttömästi.

Näytöltä otetusta kuvasta (kuva 13) nähdään 400/440 V:n jännitepiirissä 3,5 kW:n sähköteho. Kuvadataa on erilaisista jäähdytystilanteista ja nähdään, että teho vaihtelee 3,3 kW – 3,4 kW välillä. Tarkempaan tulosta varten voidaan sähkömittarin mittausta-  
tasta tallentaa digitaalista logitietoa.



Kuva 13. Logiikan näytöltä otettu kuva

Näytöltä havaittu tulos kuitenkin osoittaa sen, että mittaustavassa on lievää epävarmuutta, sillä sähkötehon pitäisi olla kompressorin tuottamaa tehoa suurempi. Lauhdutustehon manuaalinen mittaaminen jättää tilaa virheille, mutta antaa suuntaa antavia arvoja mahdollisille lisämittauksille.

$COP_r$ -arvo voidaan määrittää myös vertaamalla suoraan kompressorille toimitettua sähkötehoa mitattuun lauhdutustehoon:

$$Q_{\text{höyrystin}} = Q_{\text{lauhdutin}} - Q_{\text{kompressori}} = 10,58 \text{ kW} - 3,5 \text{ kW} = 7,08 \text{ kW}$$

$$COP_r = \frac{Q_i}{W_{\text{net},in}} = \frac{7,08 \text{ kW}}{3,48 \text{ kW}} \approx 2,034 \dots \text{ kW}$$

## 9 Jäähdytysteho

Jäähdytystehoa tarkasteltiin kahdella lämpökuormalla. Ensimmäisessä testissä lastattiin 3,65 kg sahajauho-glykoliseosta 65 - 70 °C:n lämpötilassa kymmeneen GN-malliseen pannuun. Toisessa testissä tehtiin samat toimenpiteet 5,5 kg:n kuormalla pannua kohden. Pannut lastattiin pikajäähdyttimen sisään sopivaan kuljetustelineeseen, eli räkkiin (kuva 14). Pikajäähdyttimen sisätilaan sijoitettiin yhteensä kolmetoista termopari anturia. Tuulettimiin laitettiin neljä anturia; yksi märkämittari ja yksi kuivamittari sekä imu- että paluupuolelle (kuva 16). Sisätilaan laitettiin lisäksi kaksi Testo 435 -yleismittariin sopivaa anturia; yksi jolla mitattiin sisäilman kosteutta ja yksi, jolla mitattiin ilman virtausta jäähdyttimen sisätilan keskiosassa. Räkkiin laitetuista pannuista yhdeksän kappaletta varustettiin termopari antureilla (kuva 15), jotka kytkettiin GL-800-mittasemaan. Pikajäähdyttimen logiikkaan kytketty probe-anturi laitettiin ylimmäiseen pannuun, jotta voitiin seurata jäähdytystapahtumaa myös logiikan näytöltä.



Kuva 14. Pikajäähdyttimen sisätila juuri ennen ensimmäisen testin aloittamista. Edessä näkyvät mustat johdot kulkeutuvat sisällä olevista antureista GL-800-dataloggeriin.





Kuva 15. Yksityiskohta termoparin asentamisesta sahajauhoon



Kuva 16. Kuiva- ja märkälämpömittari höyrystimen imupuolella

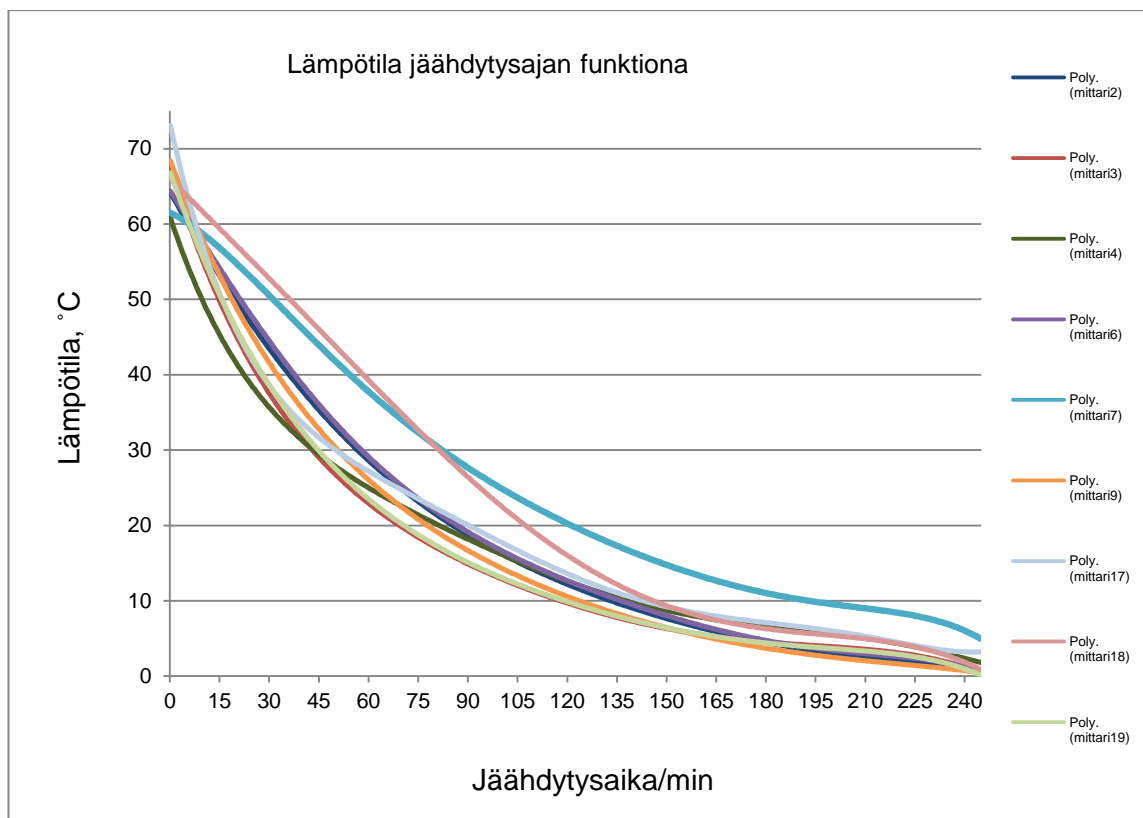
Tuotteiden sisälämpötilan muuttumisesta arvioitiin niiden vaatima jäähdytystehon tarve. Kosteuden tiivistyminen höyrystimelle mitattiin jäähdyttimen lattialle valuvasta vedestä jäähdytyksen jälkeen. Jäähdytін on rakennettu niin, että ilman kosteudesta aiheutuva tiivistynyt vesi valuu sulatuksen aikana jäähdyttimen höyrystinkonstruktion kanavia pitkin putkesta ulos. Tässä testissä mitattiin yksinkertaisesti elektronisella vaa'alla tiivistyneen veden paino, kun se oli valunut putken päässä olevaan ämpäriin. Laitteessa toteutuneen höyrystintehon voi teoriassa arvioida mittaamalla lämpötiloja höyrystimen

imu- ja paluupuolella; arvioiden vielä kosteuden tiivistymisen aiheuttama energiamäärä ja ilman massavirta, voidaan höyrystinteho määrittää sisätilan ominaisuuksista. Testin jälkeen pyrittiin myös arvioimaan seinämien kautta tapahtuvaa lämpöhäviötä testihuoneen lämpötilan ja pikajäähdyttimen sisälämpötilan lämpötilaerosta.

Jäädystystehon tarvetta ja höyrystintehoja vertaillaessa ja mitatessa on hyvä ymmärtää, että jäähdyttimen kompressorin ei ole jäädystystapahtuman aikana koko ajan päällä. Jäähdyttimen sisätilan lämpötilaa säätelee jääkaapeissa yleensä termostaatti. Huoneistolämpötilan noustessa tiettyyn asetusarvoon termostaatti kytkee kompressorin päälle, jolloin kompressorin toimii siihen asti, kun huoneistolämpötila on laskenut asetettuun arvoon. SeaKingin pikajäähdyttimessä sisälämpötila-arvot ohjaavat termostaatin avulla magneettiventtiileitä ja alipainekytkin ohjaa kompressorin. Magneettiventtiilit päästävät kylmäaineen virtaamaan höyrystimiin raja-arvojen antamissa rajoissa, nämä arvot ovat  $-7\text{ °C}$  , ja  $-9\text{ °C}$ . Tämä tarkoittaa sitä, että magneettiventtiilit avautuvat, kun lämpötila on  $-7\text{ °C}$  , ja sulkeutuvat kun lämpötila on  $-9\text{ °C}$  .

## 9.1 Tuotteiden sisälämpötilat

Tuotteiden sisälämpötiloja mittavien mittareiden antamat lämpötila-arvot käsiteltiin Excel-taulukko-ohjelmassa. Kuvissa 17 ja 18 nähdään jokaisessa termoparilla varustetussa pannussa oleva lämpötila ajan suhteen.



Kuva 17. GL800-dataloggeriin tallentuneet lämpötilatiedot 37,5 kg:n lastin jäähdyttämisestä

Edellä esitetystä graafista pystytään päättelemään, että jäähdytys 35 kg sahajauho-glykoliseoksella näyttää onnistuneelta. Tuotteita jäähdytettiin neljän tunnin ajan, ja ne jäähtyivät noin 70 °C:sta alle 5 °C:seen. Tarkempi tarkastelu suoritetaan GL800-dataloggerin antamien taulukkoarvojen avulla, joista voidaan laskea myös aloitus- ja päätöspisteiden sekä kahden tunnin kontrollipisteen keskiarvoiset lämpötilat.

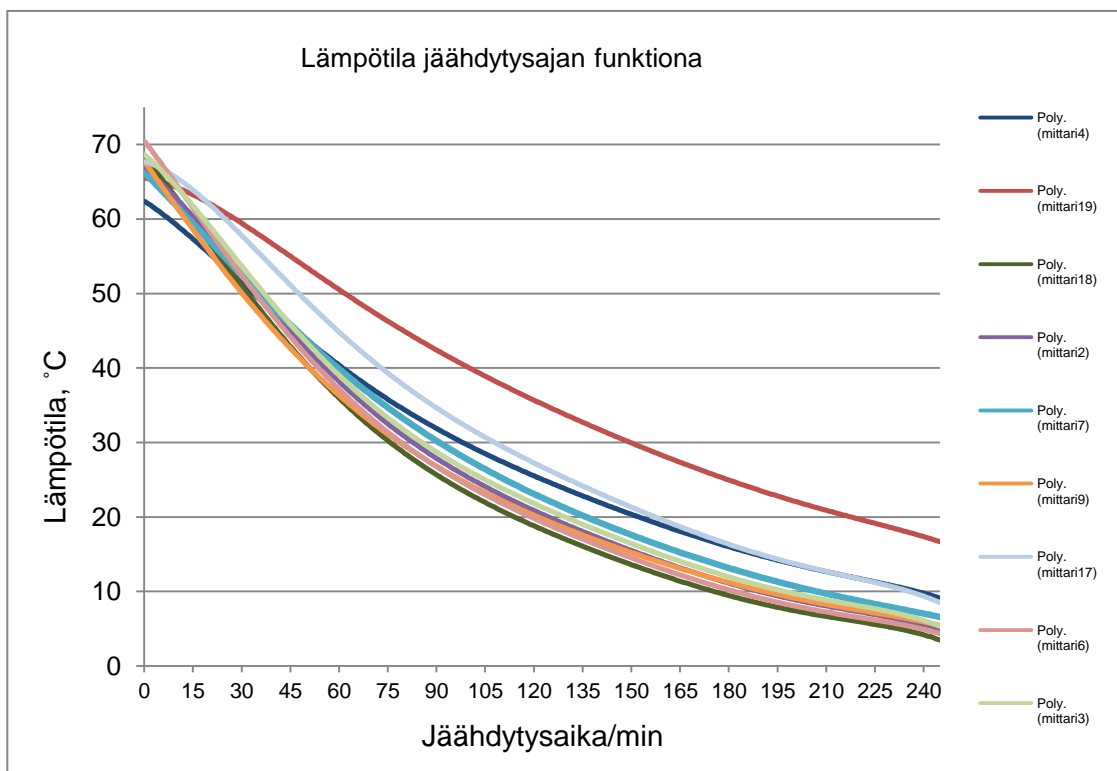
Taulukko 5 esittää selvästi eri mittarien poimimat lämpötilat. Suurimmat poikkeamat muihin lämpötiloihin ovat taulukossa ja graafissa havaittavissa termoparin nro 7 ja nro 18 kohdalla. Nämä sijaitsivat jäähdyttimen keskiosaan sijoitetuissa pannuissa. Huonoiten jäähtynyt nro 7 oli keskellä ylhäältä katsoen kuudennella rivillä ja nro 18 sen alapuolella.

Taulukko 5. Termoparien ilmoittamat lämpölukemat GL800-dataloggerissa testin alussa, keskivälissä ja lopussa

		Mittari2	Mittari3	Mittari4	Mittari6	Mittari7	Mittari9	Mittari17	Mittari18	Mittari19	
	Time/min	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	Keskiarvo
Aloitus	0,17	63	66	61	62	61	67	71	64	64	64,3
Keskiväli	120,00	12	10	13	13	20	11	14	16	10	13,2
Lopetus	240,00	1	1	2	1	6	1	3	2	1	2,0

Testin mukaan kahden tunnin jäädytyksessä, jäädytettäessä sahajauho-glykoli-seosta, pikajäädytin täyttää VSP:n määräykset pikajäädyttimille, mutta neljän tunnin jäädytyksen jälkeen yhdessä pannussa on edelleen liian korkea lämpötila. Huono jäähtyminen selittyy enimmäkseen testissä käytetyllä räkkityypillä. Jäädytyksen ja testin parannuksia tarkastellaan työn päätelmäluvussa.

Kuvassa 18 on esitetty lämpötila jäädytysajan funktiona, kun jäädyttimessä on 55 kg lasti. Lyhyellä tarkastelulla voidaan sanoa, että esimerkiksi mittarin 19 mittaama tuote ei ole jäähtynyt haluttuun lämpötilaan. Tarkempi tarkastelu suoritetaan GL800-dataloggerin antamien taulukkoarvojen avulla.



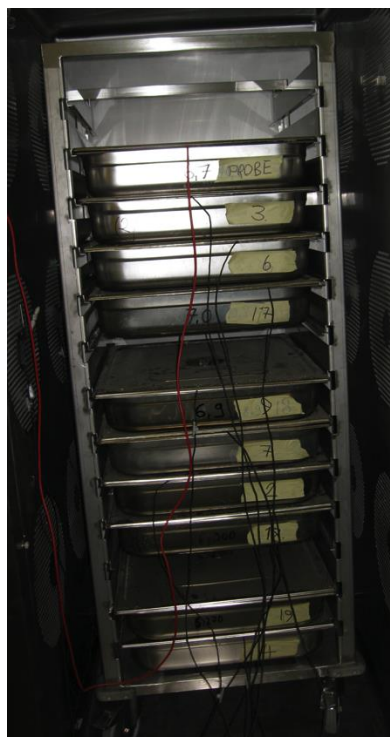
Kuva 18. GL-800-dataloggeriin tallentuneet lämpötilatiedot 55 kg lastin jäädyttämisestä

Taulukko 6 havainnollistaa toisen testin lämpötilatietoja. Tässä testissä suurimmat poikkeamat muihin lämpötiloihin on mittarinumeroiden 4,19 ja 17 kohdalla. Mittarit alhaalta ylös luettuna 4 ja 19 sijaitsivat alimmaisella kahdella rivillä. Mittari 17 sijaitsi kutakuinkin keskellä ylhäältä alas luettuna viidennellä rivillä. Kuvassa 19 näkyy mittareiden sijoittuminen pikajäähdyttimen sisällä.

Taulukko 6. Termoparien ilmoittamat lämpölukemat GL800-dataloggerissa toisen testin alussa, keskipäivällä ja lopussa

		Mittari4	Mittari19	Mittari18	Mittari2	Mittari7	Mittari9	Mittari17	Mittari6	Mittari3	
	Time/min	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	degC	Keskiarvo
Aloitus	0,17	61	65	66	65	65	66	66	67	64	65,0
Keskiväli	120,00	26	36	19	21	23	20	27	20	22	23,8
Lopetus	240,00	10	17	4	6	7	6	9	5	6	7,8

Toisen testin tuloksesta vain mittari 6 olisi päässyt läpi VSP:n hygieniamääräyksistä. Edellä suoritetun kahden testin perusteella voidaan sanoa, että jäähtyminen on heikointa jäähdyttimen keskiosassa, kun jäähdytin on lastattu testin kaltaisella kuormalla. Asian varmistamiseksi tarvitaan kuitenkin lisää testejä.



Kuva 19. Pikajäähdyttimen sisätila juuri ennen toisen testin aloittamista. Edessä näkyvät mustat johdot kulkeutuvat sisällä olevista antureista GL800-dataloggeriin.

## 9.2 Tuotteiden jäähtymisen tuoma lämpömäärä

Tarkastellaan toisen jäähtymistestin jäähtyttävien tuotteiden lämpötehoa. Tuotteiden lämpöteho neljän tunnin jäähtymisen aikana lasketaan teoriaosuudessa käsitellyn kaavan mukaisesti.

$$\begin{aligned}\phi_{\text{tuotteet}} &= \frac{Q}{t} = \frac{m c_p (T_2 - T_1)}{t} = \frac{m_1 c_{p1} (T_2 - T_1) + m_2 c_{p2} (T_2 - T_1)}{t} \\ &= \frac{44 \text{ kg} \cdot 0,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (65 - 7,8)^\circ\text{C} + 11 \text{ kg} \cdot 2,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (65 - 7,8)^\circ\text{C}}{14400 \text{ s}} \approx 0,28 \text{ kW}\end{aligned}$$

$m_1$  sahajauhon massaosuus [kg]

$m_2$  glykolin massaosuus [kg]

$c_{p1}$  sahajauhon ominaislämpö [kJ/kgK]

$c_{p2}$  glykolin ominaislämpö [kJ/kgK]

$T_2 - T_1$  lämpötilamuutos jäähdytyksen aikana [K] tai [°C]

$t$  lämpötilamuutos jäähdytyksen aikana [K] tai [°C]

## 9.3 Kosteuden tiivistymisen tuoma lämpömäärä

Jäähdytyksen aikana tapahtunutta kosteuden tiivistymistä arvioitiin sulatuksen aikana höyrystimien pinnoilta valuneesta vedestä jäähtymisen jälkeen. Kuvassa 20 mittauksessa käytetty elektroninen vaaka ja vedenkeruuseen käytetty ämpäri.



Kuva 20. Sulatetun veden punnitus.

Mitatun veden määräksi todettiin 0,54 kg molemmilla jäähdytyskerroilla. Mittaustulokseen sisältyy siis ilman kosteuden tiivistyminen sekä tuotteiden hengityslämpö. Tuloksesta voidaan arvioida, että jäähdytetty sahajauho oli nimenomaan kuivaa sahajauhoa, koska tiivistynyttä vettä on vähän. Suurin osa tiivistyneestä vedestä oli siis peräisin jäähdyttimen sisällä olevasta lämpimästä kosteasta sisäilmasta ennen jäähdytystä. Lasketaan teoriaosuudessa esitelty latenttilämpö, joka aiheutuu veden tiivistymisestä höyrystimen pinnoille.

$$\dot{\Phi}_{latent} = \dot{m}h_{latent} = \frac{mh_{latent}}{t} = \frac{0,54 \text{ kg} \cdot 333,7 \text{ kJ/kg}}{14400} \approx 0,0125 \text{ kW}$$

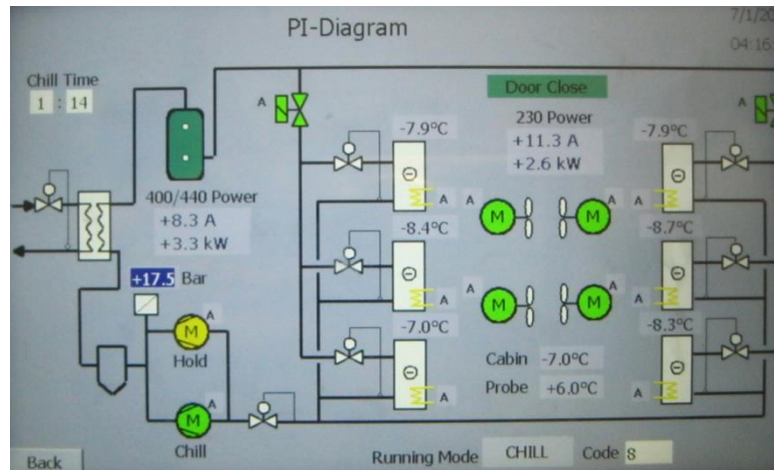
*m* höyrystimiltä valunut neste jäähdytyksen jälkeen [kg]

*h<sub>latent</sub>* veden latenttilämpö [kJ/kg]

#### 9.4 Koneiston aiheuttama lämpökuorma

Jäähdytinkoneiston aiheuttama lämpökuorma koostuu tuulettimien kuluttamasta tehosta ja muista lämpöä tuottavista komponenteista jäähdyttimen sisällä. SeaKingin pika-jäähdyttimen koneiston aiheuttaman kuorman jäähdytyksen aikana voi lukea logiikan näytöltä jäähdytyksen aikana.

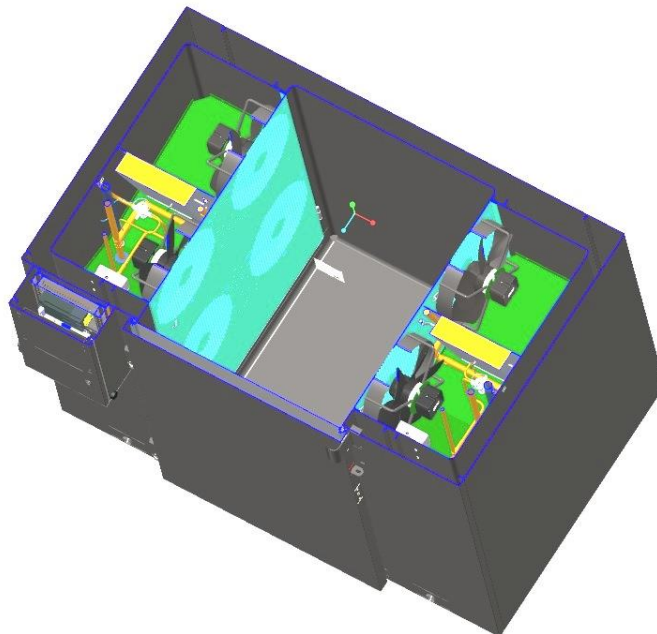
Näytöltä otetusta kuvasta (kuva 21) havaitaan 230 V:n jännitepiirissä 2,6 kW:n sähköteho. Vastaavanlaisia kuvia otettiin jäähdytyksen aikana ja havaittiin, että sähköteho oli keskimäärin 2,7 kW koko jäähdytyksen ajan. Koneiston aiheuttama lämpökuorma,  $\dot{\Phi}_{koneisto}$ , on siis keskimäärin 2,7 kW.



Kuva 21. Jäähdytyksen aikana logiikan näytöltä otettu kuva

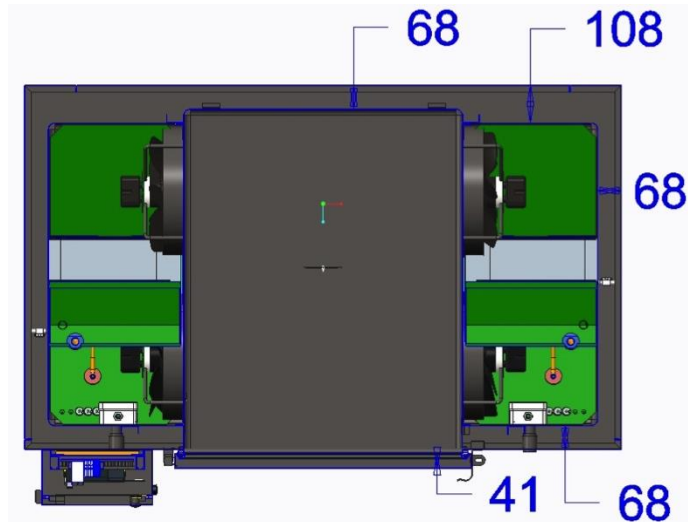
## 9.5 Lämpöhäviöt seinämistä

Arvioidaan jäähdytyksen aikana tapahtuvat seinämien lämpöhäviöt. Pikajäähdyttimen eristekerros ei ole samanlainen jokaisella seinämällä, siksi seinämien kautta tapahtuvia häviöitä arvioidaan yksilöllisesti jokaiselle seinämälle. SeaKingin pikajäähdyttimen runko on valmistettu kauttaaltaan 1 mm paksusta ruostumattomasta teräksestä. Seinämät on vuorattu polyuretaanieristeellä. Kuvat 22 ja 23 esittävät pikajäähdyttimen halkileikkauksen muodon.



Kuva 22. Halkileikkaus pikajäähdyttimen rungosta





Kuva 23. Halkileikkaus pikajäähdyttimen rungosta. Eristeseinämän paksuus ilmoitettu millimetreinä.

Lämpöhäviöt seinämistä lasketaan teoriaosuudessa selvitettyjen kaavojen mukaan. Jokaiselle seinämälle omat kokonaislämmönsiirtovastukset (kaava 16). Lämmönsiirtovastus yhdelle seinämälle pikajäähdyttimessä:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{1}{M_{total}}$$

$L_1$  ulkoseinämän materiaalin vahvuus [m]

$L_2$  eristekerroksen paksuus [m]

$L_3$  sisäseinämän materiaalin vahvuus [m]

$\lambda_1$  sisäseinämän lämmönjohtavuus [W/mK]

$\lambda_2$  eristeen lämmönjohtavuus [W/mK]

$\lambda_3$  ulkoseinämän lämmönjohtavuus [W/mK]

$\alpha_0$  ulkoseinämän lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

$\alpha_i$  sisäseinämän lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K]

Sisäseinämän ja ulkoseinämän lämmönjohtavuudeksi asetettiin ruostumattoman teräksen ohjearvo, 15,6 W/mK. Eristeen lämmönjohtavuudeksi polyuretaanin ohjearvo, 0,023 W/mK. Ulkoseinämän lämmönsiirtokerroinena käytettiin arvoa 30 W/m<sup>2</sup>K, ja sisäseinämässä arvoa 20 W/m<sup>2</sup>K. Vastaavalla laskulla saatiin näin ollen selvitettyä pikajäähdyttimen oven lämmönsiirtovastus, kun otettiin huomioon oven seinämänpaksuudet:

$$k_{ovi} = \frac{1}{\frac{1}{30 \text{ W/m}^2\text{K}} + \frac{0,001}{15,6 \text{ W/mK}} + \frac{0,041}{0,023 \text{ W/mK}} + \frac{0,001}{15,6 \text{ W/mK}} + \frac{1}{20 \text{ W/m}^2\text{K}}} \approx 0,54 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Seuraavaksi selvitettiin lämpöhäviö oven läpi, kun tiedettiin pikajäähdyttimen ulkopuoleisen lämpötilan olevan 27 °C ja sisälämpötilan tiedettiin jäähdytyksen aikaisten mittausten perusteella olevan keskimäärin -4,14 °C koko jäähdytyksen ajan. Todellisuudessa lämpötila vaihtelee koko ajan, mutta keskimääräisellä sisälämpötilalla voitiin arvioida lämpötilaeroa riittävällä tarkkuudella:

$$\Phi_{ovi} = k_{ovi} \cdot A_{ovi} \cdot \Delta t = 0,54 \frac{W}{m^2K} \cdot 1,4944m^2 \cdot 22,86K \approx 18,31 W$$

$k_{ovi}$  oven lämmönsiirtovastus [ $W/m^2K$ ]

$A_{ovi}$  oven pinta – ala [ $m^2$ ]

$\Delta t$  lämpötilaero oven läpi

Seinämien kautta tapahtuva lämpöhäviö on laskettu taulukossa 7 yksittäisten osahäviöiden summana. Lämpöhäviö seinämistä on siis  $\Phi_{seinämät} = 70,16 W$ . Lämmönsiirtokerroksena sisäseinämissä käytettiin arvoa 20  $W/m^2K$ . Kyseessä on approksimaatio, ei todellinen lämmönsiirtokerroin. Lämmönsiirtokerroin voidaan määrittää laskennallisesti, mutta tässä työssä ei syvennytä sen määrittämiseen. Sen vaikutus on – kuten laskuissa nähdään – suhteellisen pieni verrattuna seinämän läpi tapahtuvaan lämmönjohtumiseen.

Taulukko 7. Lämmönsiirtovastukset ja lämpöhäviöt jokaiselle seinämälle

	Pinta- ala/ $m^2$	Seinämän paksuus/m	Lämmönsiirtovastus/ $W/m^2K$	Lämpötilaero/ $K$	Häviö/ $W$
<b>Ovi</b>	1,4944	0,041	0,53588551	22,8632	18,30947488
<b>Takaosa</b>	1,6	0,068	0,328949178	22,8632	12,03332935
<b>Kylki</b>	1,96	0,068	0,328949178	22,8632	14,74082845
<b>Oven vierusta</b>	0,42	0,068	0,328949178	22,8632	3,158748955
<b>Takaosan vierusta</b>	0,42	0,108	0,209243818	22,8632	2,009272969
<b>Kylki 2</b>	1,96	0,068	0,328949178	22,8632	14,74082845
<b>Oven vierusta 2</b>	0,42	0,068	0,328949178	22,8632	3,158748955
<b>Takaosan vierusta 2</b>	0,42	0,108	0,209243818	22,8632	2,009272969
<b>Yhteensä</b>					70,16050499

## 9.6 Jäähdytystehon tarve

Kokonaistehon tarve lasketaan edellä mainittujen komponenttien summana. Tässä testissä siihen huomioidaan tuotteiden tuoma lämpöenergia, kosteuden tiivistymisen tuoma lämpöenergia, koneiston aiheuttama lämpökuorma ja lämpöhäviöt seinästä. Nämä tiedot kertovat, miten höyrystimen tuottama kylmäteho jakautuu eri komponenttien kesken jäähdytyksen aikana.

$$\dot{Q}_{\text{seinämät}} + \dot{Q}_{\text{tuotteet}} + \dot{Q}_{\text{latent}} + \dot{Q}_{\text{koneisto}} = 0,07017\text{kW} + 0,28\text{kW} + 0,0125\text{kW} + 2,65\text{kW} = 3,0126\text{kW}$$

Aikaisemmin sisäisestä prosessista laskettu höyrystinteho oli 7,1 kW. Höyrystimen tuottaman tehon pitäisi olla sama kuin jäähdytystehon tarve. Todellisuudessa luku 7,1 kW on sidottu kompressorin käyntiaikaan eli 7,1 kW on se jäähdytysteho, mitä höyrystin tuottaa kompressorin ja lauhduttimen ollessa käynnissä. Häviöistä laskettu jäähdytysteho, 3,0126 kW, on puolestaan jatkuva teho neljän tunnin jäähdytyksen aikana.

Todellinen höyrystinteho voidaan laskea, kun tiedetään se ajanjakso neljän tunnin jäähdytyksen aikana, jolloin höyrystin tuottaa tehoa 7,1 kW. Ajan avulla voidaan laskea höyrystimen tekemä työ. Tästä työstä voidaan laskea jatkuva teho, kun tiedetään jäähdytyksen kokonaiskesto. Jäähdytyksen aikana tallennettiin tietoa kompressorin käynnistymisestä ja pysähtymisestä. Tästä informaatiosta saadaan taulukkotietona suodatettua se aika, jonka kompressori oli käynnissä neljän tunnin jäähdytyksen aikana. Lasketaan höyrystimen tekemä työ, kun tiedetään sen tuottavan 7,1 kW tehoa 104 min ajan:

$$7,1\text{kW} \cdot 6240\text{ s} = 44304\text{ kJ}$$

Tästä arvosta lasketaan neljän tunnin höyrystinteho:

$$\frac{44304\text{ kJ}}{14400\text{ s}} = 3,076\text{ kW}$$

Jäähdytysteho ei vielä ole yhtä suuri höyrystintehon kanssa, mutta hyvin lähellä sitä. Testin tuloksista voidaan huomioida, että logiikan näytöltä luetut sähkötehot eivät välttämättä vastaa todellisuutta, sillä niitä ei voida poimia täsmällisesti yhtä aikaa muita testejä tehdessä. Testin aikana ei tehty todellista tilastodataa sähkötehoista, joten laskuja varten silmämääräisesti arvioidut keskiarvot ovat jonkin verran virheellisiä.

Jäähdytystehon tarpeen laskeminen antaa hyvän arvion siitä, miten höyrystimen tuotama teho jakautuu eri komponenttien kesken. Testin perusteella voidaan todeta, että noin 86 % höyrystimen tekemästä työstä on koneiston tekemää työtä – suurimmaksi osaksi tuuletustyötä – vastaan.

### 9.7 Ilman ominaisuudet

Märät ja kuivat lämpömittarit asetettiin höyrystimen imu- ja paluukanaviin tuulettimien eteen, jotta niiden perusteella olisi voitu arvioida jäähdytetyn ja jäähdyttämättömän ilman ominaisuuksia ja sitä kautta laskea kylmäteho. Testin aikana kuitenkin todettiin, että imu- ja paluukanavan lämpötilat olivat hyvin lähellä toisiaan, mikä aiheutti sen, että laskennallisilla menetelmillä ei saatu järkevää tulosta (kaava 21). Lisäksi massavirran arviointi oli erittäin vaikeaa ilmavirtauksen nopeuden suuren vaihtelun takia.

Ilman ominaisuuksia kuvaavaa Mollier -piirrosta käsiteltiin teoriaosuudessa ilman kosteuden tuomasta lämpömäärästä kertovassa kappaleessa. Työssä testatun pikajäähdyttimen kaltaisessa pakkokonvektiolla toimivassa pikajäähdyttimessä jäähdytystehon määrittäminen ilman ominaisuuksien kautta on kuitenkin lähes mahdotonta ilmavirtojen sekoittumisen ja suuren virhemahdollisuuden takia. Kaappolan mukaan (16): *”jos tulevan ja lähtevän ilman lämpötilaero on  $2 K:n$ , jo  $0.1 K:n$  virhe lämpötilan mittauksessa aiheuttaa 5% virheen”*.

## 10 Päätelmät

Työssä esitellyt mittaustavat esittävät prototyyppejä siitä, miten jäähdytyskapasiteettia voidaan mitata. Laitteen testaamiseen oli rajallisesti aikaa, sillä testitila ja itse laite sijaitsevat Puolassa. Kaikki mittaukset suunniteltiin ja toteutettiin kahden päivän aikana. Laskutoimenpiteitä ja mittausta voi käytännössä suunnitella etäältäkin, mutta todellisten tulosten saaminen vaatii työskentelyä laitteen läheisyydessä.

Mittausten lopullinen päämäärä oli selvittää, kuinka monta kilogrammaa tuotetta pikajäähdytin jäähdyttää hygieniajärjestöjen vaatimissa rajoissa. Todellisuudessa tällaista arvoa ei voi sanoa, sillä kaikki ruoat jäähtyvät omien erityisten lämpöominaisuuksiensa mukaan. Testin tarkoituksena on siksi mielestäni kehittää pahin mahdollinen tilanne, joka vastaisi todellisuutta. Testien perusteella ei kummassakaan testissä päästy täydellisesti jäähdytystavoitteeseen. Toisaalta testi pitäisi varmistaa joka tapauksessa oikealla ruoalla tai tavaralla, joka vastaa oikean ruoan ominaisuuksia paremmin kuin sahajauho- glykoliseos. Testimetodit toimivat runkona jatkotoimenpiteille.

### 10.1 Jäähdytettäviin tuotteisiin kohdistuvat toimenpiteet

Testissä käytetty räkkityyppi ei soveltunut GN 2/1 -mallisessa pannussa olevan ruoan jäähdyttämiseen pikajäähdyttimessä. Ilmavirtaus ei päässyt kulkemaan pannujen välillä, sillä pannut olivat lähes kiinni toisissaan. Tämän lisäksi räkkityypin konstruktiossa oli rakenteellinen este, joka esti ilmavirtaa kulkemasta pannujen välillä. Tämä selittää suurelta osin odotettua hitaamman jäähtymisen. Ehdotan seuraaviin testeihin korkeampaa räkkityyppiä, joka jättää tilaa pannujen välille tai vähemmän syvää pannutyyppiä. Räkkihiekon konstruktioita voi muuttaa niin, että ilma pääsee helpommin kulkemaan pannujen välillä.

Itse jäähdytettäviksi tuotteiksi ehdotan ensisijaisesti ainetta, jossa on korkeampi vesipitoisuus, tai korkeampi ominaislämpökapasiteetti. Kalaruoat ovat erityisen haasteellisia jäähdytykselle. Korkean vesipitoisuuden ohella kalaruoilla on korkea ominaislämpökapasiteetti (liite 2). Lisäksi testissä voi käyttää korkeamman kosteuspitoisuuden omaavaa sahajauhoa.

Testin suunnitteluvaiheessa oli ajatuksena punnita jäähdytettävät tuotteet ennen jäähdytystä ja jäähdytyksen jälkeen. Tällä toimenpiteellä tulisi mitata kuinka paljon tuote on menettänyt vettä jäähdytyksen aikana. Lisäksi toimenpiteellä voisi varmistaa mistä pannusta vettä haihtuu eniten. Käytännössä laitteiston kannalta ei ole merkitystä sillä onko tiivistynyt vesi peräisin ilmasta vai jäähdytettävästä tuotteesta. Toisaalta tällä mittauksella saataisiin tieto jäähdytettävissä olevan tuotteen kosteuspitoisuudesta ja hengityslämmöstä.

Pelkän jäähdytyksen lisäksi testissä olisi hyvä tietää lämmön jakautumisesta ruoan sisällä. Siksi ehdotan seuraaviin testeihin useampia lämpömittareita pannua kohden, tai mittareita lisättäväksi kiinteään lämmitettävän aineen sisäosaan.

## 10.2 Prosessin mittauksen parantaminen

Työssä esitellyissä testeissä saatiin määritettyä pikajäädyttimen kylmäteho mitaten lämpötila-arvoja eri puolilta koneistoa. Mittaustoimenpiteet onnistuivat. Mittausmenetelmää voi parantaa tarkentamalla mittauksen ajoitusta. Kompressoritehon lukeminen, prosessin lämpötilojen mittauksen ja lauhdutusveden mittauksen pitää tapahtua samanaikaisesti. Tämä pitää tehdä siksi, että jäähdytys toimii lyhyissä jaksoissa eikä jatkuvasti.

Ajoittamalla nämä toimenpiteet voidaan varmistaa, että mitatut arvot vastaavat toisiaan. Lisäksi verkosta otetun sähkötehon mittaus olisi hyvä saada tilastotietona. Tällä toimenpiteellä varmistetaan, että tiedetään mikä on ollut verkosta otettu sähköteho mihinkin kellonaikaan. Ohjauslogiikkaan voidaan liittää prosessin paineita ja lämpötiloja mitaavia antureita. Anturien mittaamat prosessitiedot tallennetaan tämän jälkeen muistitikulle, jolloin voidaan jälkepäin logitiedoista varmistaa, että näytteet ovat samalta hetkeltä.

### 10.3 Muut toimenpiteet

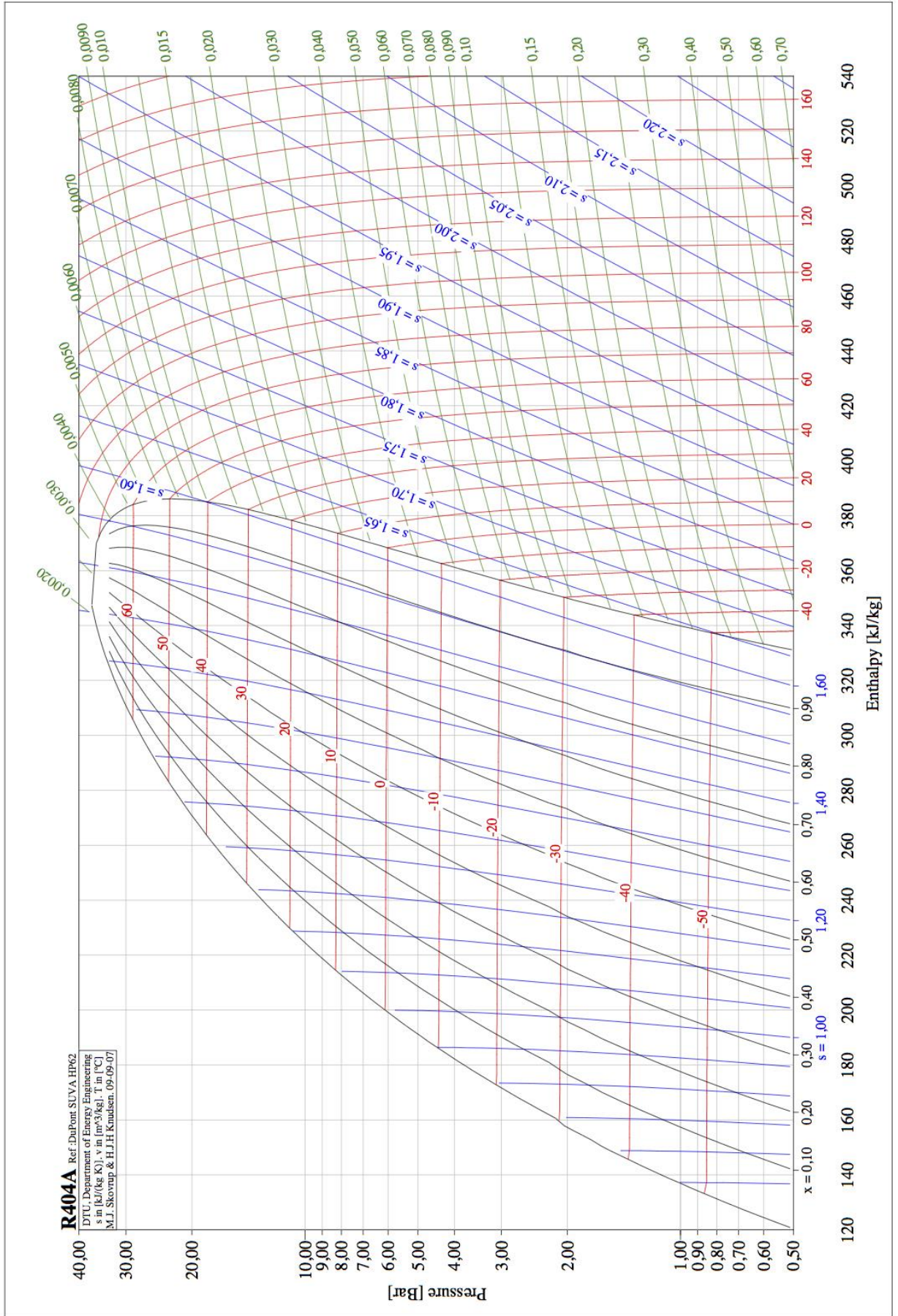
Työssä todennettujen menetelmien perusteella tehdään selvitys Puolan tehtaan työntekijöille, jotka testaavat SeaKingin pikajäähdyttimiä. Työn liitteeksi tehdään Excel-  
taulukko (liite 3), joka laskee prosessista mitattujen lämpötila-arvojen perusteella työssä selostetun COP-arvon ja eri komponenttien tuottaman tehon. P,h -piirroksen ymmärtäminen ja soveltaminen prosessista mitattujen lämpötila-arvojen kanssa on erityisen tärkeää kylmätekniikan parissa työskenteleville. Tämän lisäksi työntekijöiden on tiedettävä, mistä kohtaa koneistoa esimerkiksi alijäätynyt ja tulistunut lämpötila mitataan, ja mikä on niiden vaikutus prosessin kannalta.

## Lähteet

- 1 Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M. & Kianta, J 2011. Kylmätekniiikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.
- 2 Hakala, P. & Kaappola, E. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus.
- 3 Laitinen, A. & Kaappola, E. 1996. Ilmastoinnin jäähdytyslaitteiden ja toiminnan energiankäytön parantaminen. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- 4 Suomen kylmäyhdistys 2001. Uudet kylmäaineet ja jäähdytysjärjestelmät. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.
- 5 Aittomäki, A. 2012. Kylmäteknikka. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys.
- 6 Cengel, Y.A. 2003. Heat Transfer: A practical approach. Boston: McGraw Hill.
- 7 Cengel, Y.A. & Boles, M. 2011. Thermodynamics: An engineering approach. Boston: McGraw Hill.
- 8 Bitzer 2012. Refrigerant report 17. Verkkodokumentti.  
[http://www.izwonline.de/news/Kaeltemittel\\_Report\\_Bitzer\\_a-501-17.pdf](http://www.izwonline.de/news/Kaeltemittel_Report_Bitzer_a-501-17.pdf).  
22.03.2014.
- 9 McGraw-Hill 2012. Refrigeration and freezing of foods. Verkkodokumentti.  
<http://highered.mcgraw-hill.com/sites/dl/free/0073398128/835451/Chapter17.pdf>.  
22.03.2014.
- 10 Jumppanen, V. 2005. Pikajäähdyttimen ohjauksen kehittäminen. Diplomityö. Helsinki: Helsingin teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto.
- 11 Halttunen, J. 2002. Kiinteistökohtaisen jäähdytysenergian mittausprojekti. Insinöörityö. Vantaa: Espoo-Vantaan teknillinen ammattikorkeakoulu, Automaatiotekniikka.
- 12 Aittomäki, A. ym. 1996. Kylmäteknikka. Jyväskylä: Gummerrus Kirjapaino Oy.
- 13 Vessel Sanitation Program 2011. Construction Guidelines. Atlanta & Florida: VSP.  
<http://www.cdc.gov/nceh/vsp/constructionguidelines/constructionguidelines2011.pdf>.  
22.03.2014.
- 14 Vessel Sanitation Program 2011. Operations Manual. Atlanta & Florida: VSP.  
Verkkodokumentti.  
<http://www.cdc.gov/nceh/vsp/operationsmanual/opsmanual2011.pdf>.  
22.03.2014.
- 15 Jaurola, W. 1979. Kylmätekniiikan oppikirja. Helsinki: Suomen Kylmäyhdistys r. y.
- 16 Kaappola, E. 2014. Kylmätekniiikan asiantuntija, Danfoss. Helsinki. Henkilökohdainen tiedonanto.



### Log p,h -diagrammi kylmäaineelle R404A



## Elintarvikkeiden lämpöominaisuuksia

### 9.4

### 2006 ASHRAE Handbook—Refrigeration (SI)

Table 3 Unfrozen Composition Data, Initial Freezing Point, and Specific Heats of Foods\* (Continued)

Food Item	Moisture	Protein,	Fat, %	Carbohydrate		Ash, %	Initial Freezing Point, °C	Specific Heat Above Freezing, kJ/(kg·K)	Specific Heat Below Freezing, kJ/(kg·K)	Latent Heat of Fusion, kJ/kg
	Content, %	%		Total, %	Fiber, %					
	$x_{wo}$	$x_p$	$x_f$	$x_c$	$x_{fb}$	$x_a$				
Currants, European black	81.96	1.40	0.41	15.38	0.00	0.86	-1.0	3.71	1.95	274
red and white	83.95	1.40	0.20	13.80	4.30	0.66	-1.0	3.85	1.98	280
Dates, cured	22.50	1.97	0.45	73.51	7.50	1.58	-15.7	2.31	2.30	75
Figs, fresh	79.11	0.75	0.30	19.18	3.30	0.66	-2.4	3.70	2.25	264
dried	28.43	3.05	1.17	65.35	9.30	2.01	—	2.51	4.13	95
Gooseberries	87.87	0.88	0.58	10.18	4.30	0.49	-1.1	3.95	1.96	293
Grapefruit	90.89	0.63	0.10	8.08	1.10	0.31	-1.1	3.96	1.89	304
Grapes, American	81.30	0.63	0.35	17.15	1.00	0.57	-1.6	3.71	2.07	272
European type	80.56	0.66	0.58	17.77	1.00	0.44	-2.1	3.70	2.16	269
Lemons	87.40	1.20	0.30	10.70	4.70	0.40	-1.4	3.94	2.02	292
Limes	88.26	0.70	0.20	10.54	2.80	0.30	-1.6	3.93	2.03	295
Mangos	81.71	0.51	0.27	17.00	1.80	0.50	-0.9	3.74	1.95	273
Melons, casaba	92.00	0.90	0.10	6.20	0.80	0.80	-1.1	3.99	1.87	307
honeydew	89.66	0.46	0.10	9.18	0.60	0.60	-0.9	3.92	1.86	299
watermelon	91.51	0.62	0.43	7.18	0.50	0.26	-0.4	3.97	1.74	306
Nectarines	86.28	0.94	0.46	11.78	1.60	0.54	-0.9	3.86	1.90	288
Olives	79.99	0.84	10.68	6.26	3.20	2.23	-1.4	3.76	2.07	267
Oranges	82.30	1.30	0.30	15.50	4.50	0.60	-0.8	3.81	1.96	275
Peaches, fresh	87.66	0.70	0.90	11.10	2.00	0.46	-0.9	3.91	1.90	293
dried	31.80	3.61	0.76	61.33	8.20	2.50	—	2.57	3.49	106
Pears	83.81	0.39	0.40	15.11	2.40	0.28	-1.6	3.80	2.06	280
Persimmons	64.40	0.80	0.40	33.50	0.00	0.90	-2.2	3.26	2.29	215
Pineapples	86.50	0.39	0.43	12.39	1.20	0.29	-1.0	3.85	1.91	289
Plums	85.20	0.79	0.62	13.01	1.50	0.39	-0.8	3.83	1.90	285
Pomegranates	80.97	0.95	0.30	17.17	0.60	0.61	-3.0	3.70	2.30	270
Prunes, dried	32.39	2.61	0.52	62.73	7.10	1.76	—	2.56	3.50	108
Quinces	83.80	0.40	0.10	15.30	1.90	0.40	-2.0	3.79	2.13	280
Raisins, seedless	15.42	3.22	0.46	79.13	4.00	1.77	—	2.07	2.04	52
Raspberries	86.57	0.91	0.55	11.57	6.80	0.40	-0.6	3.96	1.91	289
Strawberries	91.57	0.61	0.37	7.02	2.30	0.43	-0.8	4.00	1.84	306
Tangerines	87.60	0.63	0.19	11.19	2.30	0.39	-1.1	3.90	1.93	293
<b>Whole Fish</b>										
Cod	81.22	17.81	0.67	0.0	0.0	1.16	-2.2	3.78	2.14	271
Haddock	79.92	18.91	0.72	0.0	0.0	1.21	-2.2	3.75	2.14	267
Halibut	77.92	20.81	2.29	0.0	0.0	1.36	-2.2	3.74	2.18	260
Herring, kippered	59.70	24.58	12.37	0.0	0.0	1.94	-2.2	3.26	2.27	199
Mackerel, Atlantic	63.55	18.60	13.89	0.0	0.0	1.35	-2.2	3.33	2.23	212
Perch	78.70	18.62	1.63	0.0	0.0	1.20	-2.2	3.71	2.15	263
Pollock, Atlantic	78.18	19.44	0.98	0.0	0.0	1.41	-2.2	3.70	2.15	261
Salmon, pink	76.35	19.94	3.45	0.0	0.0	1.22	-2.2	3.68	2.17	255
Tuna, bluefin	68.09	23.33	4.90	0.0	0.0	1.18	-2.2	3.43	2.19	227
Whiting	80.27	18.31	1.31	0.0	0.0	1.30	-2.2	3.77	2.15	268
<b>Shellfish</b>										
Clams	81.82	12.77	0.97	2.57	0.0	1.87	-2.2	3.76	2.13	273
Lobster, American	76.76	18.80	0.90	0.50	0.0	2.20	-2.2	3.64	2.15	256
Oysters	85.16	7.05	2.46	3.91	0.0	1.42	-2.2	3.83	2.12	284
Scallop, meat	78.57	16.78	0.76	2.36	0.0	1.53	-2.2	3.71	2.15	262
Shrimp	75.86	20.31	1.73	0.91	0.0	1.20	-2.2	3.65	2.16	253
<b>Beef</b>										
Brisket	55.18	16.94	26.54	0.0	0.0	0.80	—	3.19	2.33	184
Carcass, choice	57.26	17.32	24.05	0.0	0.0	0.81	-2.2	3.24	2.31	191
select	58.21	17.48	22.55	0.0	0.0	0.82	-1.7	3.25	2.24	194
Liver	68.99	20.00	3.85	5.82	0.0	1.34	-1.7	3.47	2.16	230
Ribs, whole (ribs 6-12)	54.54	16.37	26.98	0.0	0.0	0.77	—	3.16	2.32	182
Round, full cut, lean and fat	64.75	20.37	12.81	0.0	0.0	0.97	—	3.39	2.18	216
full cut, lean	70.83	22.03	4.89	0.0	0.0	1.07	—	3.52	2.12	237
Sirloin, lean	71.70	21.24	4.40	0.0	0.0	1.08	-1.7	3.53	2.11	239
Short loin, porterhouse steak, lean	69.59	20.27	8.17	0.0	0.0	1.01	—	3.49	2.14	232
T-bone steak, lean	69.71	20.78	7.27	0.0	0.0	1.27	—	3.49	2.14	233
Tenderloin, lean	68.40	20.78	7.90	0.0	0.0	1.04	—	3.45	2.14	228
Veal, lean	75.91	20.20	2.87	0.0	0.0	1.08	—	3.65	2.09	254

## Kuvakaappaus Excel-tilukosta

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

	A	B	C	D
1		Temperature	Enthalpy	
2	Subcooling temperature	35	254,8	
3	Superheat temperature	-6	366,54	
4	After compression temperature	69	418,3	
5	After valvework		254,8	
6				
7	COP	2,158809892		
8				
9				
10				
11	The Condenser Power			
12				
13	Water/ kg	5		
14	Time/ sec	65		
15	Cold water temperature/ C	10,9		
16	Warm water temperature/ C	45,2		
17	Specific heat of water/ kJ/kg	4,18		
18				
19	Power/ kW	11,02876923		
20				
21	Refrigerant mass flow/ kg/s	0,067454246		
22				
23	Power Calculations, using the calculated mass flow.			
24	Compressor power/ kW	3,491431776		
25	Evaporator power/ kW	7,537337455		
26				
27				
28	Power calculations, reading the compressor power from the control logic.			
29	Compressor power/ kW	3,5		
30	Evaporator power/ kW	7,528769231		
31				
32	COP	2,151076923		
33				
34				
35				
36				
37				

The formula bar shows the calculation for COP:  $= (C3 - C5) / (C4 - C3)$ .