

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Vesilauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaite

Water cooled portable air conditioner

Työn tarkastaja: Tero Tynjälä

Työn ohjaaja: Tero Tynjälä

Lappeenranta 25.9.2013

Tero Viander

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Tero Viander

Opinnäytteen nimi: Vesilauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaite

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2013

41 sivua, 5 kuvaa, 1 taulukko, 12 yhtälöä ja 2 liitettä

Hakusanat: Ilmastointilaite, siirrettävä, jäähdytys, vesilauhdutteisuus, höyrystysprosessi

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on syventyä siirrettävien ilmastointilaitteiden tekniikkaan ja toimintaan, sekä tarkastella tavanomaisesta poikkeavana ratkaisuna vesilauhdutteisuutta ilman jäähdytykseen tarkoitettussa ilmastointilaitteessa. Tarkastelu aloitetaan ilmastoinnista siirrettävillä laitteilla käsitellen yleisesti käytössä olevien laitteiden toimintoja ja ominaisuuksia. Tavanomaisia ilmalauhdutteisia siirrettäviä ilmastointilaitteita tarkastellaan lähemmin esimerkkilaitteen kautta. Työn pääaiheena on pienikokoinen vesilauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaite, joka jäähdyttää huoneilmaa siirtämällä lämmön seisovaan veteen kompressorilämpöpumpun avulla. Työ kuvaa tällaisen laitteen idean ja toimintaperiaatteen sekä syvempänä tarkasteluna esimerkkilaitteen toiminnan teoreettisen suunnittelun ja mitoituksen. Lopuksi pohditaan tällaisen laitteen järkevyyttä ja kannattavuutta sekä ruoditaan mahdollisia sovellutuksia vesilauhdutteiselle jäähdytykselle.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	6
2 Kompressorijäähdytyksen prosessi ja tekniikka	8
2.1 Höyrystysprosessi.....	8
2.2 Kompressorijäähdytyksen tekniikka	12
2.2.1 Kompressorit	13
2.2.2 Kiertoaineet	14
2.2.3 Höyrystimet ja lauhduttimet.....	15
2.2.4 Sääätötekniikka ja paisuntaventtiilit	17
3 Siirrettävät ilmastointilaitteet	20
3.1 Ilmalauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaitte	20
3.2 Vesilauhdutteiset siirrettävät ilmastointilaitteet	24
4 Vesilauhdutteisen siirrettävän ilmastointilaitteen mitoitus	27
4.1 Lämpötilatasot	27
4.2 Kiertoaine	28
4.3 Kiertoprosessi	29
4.3.1 Kompressori	32
4.3.2 Paisuntaventtiili.....	34
4.3.3 Tehot ja tehokertoimet	34
4.4 Lämmönsiirto	36
4.4.1 Lämmönsiirto ilmasta kiertoaineeseen.....	36
4.4.2 Lämmönsiirto kiertoaineesta veteen	38
5 Mitoituksen tarkastelu	39
6 Yhteenveto	41
Lähdeluettelo	42
Liite 1. Domesto PRO9000BTU -ilmastointilaitteen tunnuskilvet ja tekniset tiedot	44
Liite 2. Mitoitetun prosessin kolme tarkasteltua vaihetta log(p),h-piirroksessa	45

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
c	ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
h	ominaisentalpia	[kJ/kg]
m	massa	[kg]
n	pyörimisnopeus	[1/s]
P	teho	[W]
q	lämmönsiirtoteho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
T	lämpötila	[K, °C]
t	aika	[s]
U	kokonaislämmönläpäisyyluku	[W/m ² K]
V	iskutilavuus	[m ³]
v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
W	työ veden lämmittämiseksi	[J]
w	ominaistyö	[kJ/kg]

Kreikkalaiset aakkoset

ΔT_m	keskimääräinen lämpötilaero	[K]
Φ	lämpöteho	[W]

Dimensiottomat luvut

Δ	muutos
ε	todellisen prosessin kylmäkerroin
ε_t	teoreettinen kylmäkerroin
η	hyötysuhde

Alaindeksit

1...6	prosessipisteet
ave	keskimääräinen
H	höyrystin

i	ilma
K	kompressori
L	lauhdutin
m	moottori
mk	mekaaninen
p	kiertoaine (propaani)
s	isentrooppi
v	vesi
v10	vesi lämpötilassa 10 °C
v40	vesi lämpötilassa 40 °C

Lyhenteet

CFC	hiiltä, klooria ja fluoria sisältävä
HCFC	hiiltä, klooria fluoria ja vetyä sisältävä
HFC	fluorihiihivety
HC	hiihivety
R12	tunnus kylmäaineelle Freon-12 (diklooridifluorimetaani)
R290	tunnus propaanille kylmäaineena
R410A	kylmäainetunnus (difluorietaanin ja pentafluorietaanin sekoitus)
R421A	kylmäainetunnus (pentafluorietaanin ja tetrafluorietaanin sekoitus)

1 JOHDANTO

Ilmastoinnilla tarkoitetaan usein puhekielessä ilmanvaihtoa tai -jäähdytystä, mutta sanan oikea merkitys on laajempi. Se tarkoittaa ilman käsittelyä ja sisäilman laadun hallintaa. Tärkeimmät tavat käsitellä ilmaa ovat lämmitys ja jäähdytys. Ilman jäähdyttäminen on globaalisti huomattavasti lämmitystä suurempi ongelma ja haaste. Huolimatta pitkästä ja kylmästä talvesta, Suomessakin ilmaston lämmittäessä ja ihmisten mukavuudenhalun lisääntyessä jäähdytyksen tarve jatkaa kasvuaan. Suurien kohteiden, kuten teollisuusrakennusten, toimistojen ja julkisten tilojen, jäähdytys toteutetaan yleensä ilmanvaihdon yhteydessä tehokkailla kylmäkoneilla. Kotitalouksissa jäähdytys on kuitenkin harvoin kiinteä osa ilmanvaihtoa, eikä koneellista jäähdytystä usein ole ollenkaan. (Seppänen 1996) Erityisesti pientaloihin on viime aikoina asennettu runsaasti ilmalämpöpumppuja, joilla jäähdytyksen lisäksi voi lämmittää taloa energiatehokkaasti.

Siirrettäville ilmastointilaitteille on Suomessakin edelleen huomattavasti tarvetta, vaikka ilmalämpöpumppujen suosio on ollut pitkään kasvussa. Erityisesti hellekausina myös siirrettävät ilmastointilaitteet käyvät erittäin hyvin kaupaksi. (Repo 2010) Tohtori Philip M. Parkerin vuonna 2008 tekemässä raportissa esitellään yli kahdentuhannen kaupungin kotitalouskokoluokan siirrettävien ilmastointilaitteiden myynnin arvioitu markkinapotentiaali vuodelle 2009. Listalla on kaupunkeja yli kahdestasadasta maasta ja ne on listattu markkinapotentiaalinsa perusteella. Helsinki on sijoittunut tällä listalla sijalle 213. Lisäksi mukana on kymmenen muuta kaupunkia Suomesta ja ne ovat kaikki tuhannen suurimman joukossa. Listauksen kärkikaupungit New York, Pariisi ja Los Angeles ovat kuitenkin koko Suomeen verrattuna moninkertaisia markkina-alueita. (Parker 2008)

Siirrettävillä ilmastointilaitteilla on esimerkiksi ilmalämpöpumppuun verrattuna selvät etunsa, joiden ansiosta niille tulee olemaan jatkossakin kysyntää. Siirrettävien ilmastointilaitteiden hinnat alkavat kahdensadan euron tuntumasta, kun puhutaan pienistä huonekohtaisista laitteista. Useiden kymmenien neliömetrien huonetiloja jäähdyttävien laitteiden hinnat ovat jo lähempänä tuhatta euroa jälleenmyyjien hintojen perusteella. Ilmalämpöpumppuissa maksaa laitteen lisäksi ammattilaista vaativa

asennustyö, jolloin kokonaiskustannukset kasvavat helposti yli kahdentuhannen euron (Kuluttaja- ja kilpailuvirasto 2009). Ilmalämpöpumpun asennus vaatii runsaiden kustannusten lisäksi kiinteitä ja pysyviä rakenteellisia muutoksia rakennuksen rakenteisiin, joita ei esimerkiksi vuokratuissa tiloissa ole aina mahdollista tehdä. Siirrettävien ilmastointilaitteiden asennus on väliaikainen. Kolmas merkittävä etu tulee siirrettävyydestä. Siirrettävällä ilmastointilaitteella on mahdollista jäähdyttää keskitetysti juuri tarpeen mukaista paikkaa, kun taas ilmalämpöpumpulla jäähdytetään tehottomasti laajaa aluetta aina samasta asennuspaikasta. (Skaer 2006)

Siirrettävän ilmastointilaitteen hyötyjä on selvitelty, mutta millaisia ovat niiden haittapuolet? Minkälaista tekniikkaa siirrettävät ilmastointilaitteet sisältävät? Kuinka kilpailukykyinen ratkaisu vesilauhdutteisuus on ilmalauhdutteisuuteen verrattuna siirrettävissä ilmastointilaitteissa? Entä olisiko mahdollista toteuttaa vesilauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaitte ilman jatkuvaa veden syöttöä? Tällöin ehkä vältettäisiin monta siirrettävien ilmastointilaitteiden haittatekijää, mutta luotaisiin samalla uusia tilalle. Miten tällainen laite toimisi ja olisiko se toimiessaan järkevä? Ilmalauhdutteisten siirrettävien jäähdytyslaitteiden tuottama kuuma ilma puhalletaan ulos. Voisiko vesilauhdutteisen laitteen tuottamaa lämmintä vettä hyödyntää jotenkin?

Tässä kandidaatintyössä syvennyttään yleisesti käytössä olevien siirrettävien ilmastointilaitteiden tekniikkaan ja toimintaan. Aluksi keskitytään höyrystysprosessiin perustuviin kompressorijäähdytyslaitteisiin ja niiden tekniikkaan sekä prosessiteoriaan. Tarkastelu keskittyy erityisesti pienten tilojen laitteisiin kotitalouksille tyypillisessä jäähdytystehoskaalassa 1-5 kW. Työssä esitellään esimerkkilaitteen pohjalta tyypillisen ilmalauhdutteisen siirrettävän ilmastointilaitteen tekniikkaa. Työn pääpaino on kuitenkin vesilauhdutteisuudessa, ja tarkemmin työssä keskitytään vesilauhdutteisen siirrettävän ilmastointilaitteen sovellukseen, jossa jäähdytysprosessin lämpönieluna käytetään vesisäiliötä. Tällaiselle laitteelle tehdään teoreettinen valittuihin arvoihin perustuva mitoitus. Lisäksi pohditaan suunnitellun laitteen mielekkyyttä, vertaillaan sitä markkinoilla oleviin laitteisiin ja mietitään miten sitä voisi parantaa.

2 KOMPRESSORIJÄÄHDYTYKSEN PROSESSI JA TEKNIikka

Jäähdytyksessä on aina kyse lämmön siirtämisestä kohteesta toiseen. Kun esimerkiksi huonetilaa halutaan jäähdyttää, on sen sisältämää energiaa siirrettävä muualle. Tämä voidaan tehdä suoraan, vaikka tuulettamalla, jos tila on ympäristöään lämpimämpi. Jos jäähdytettävä tila halutaan saattaa ympäristöään matalampaan lämpötilaan, on tehtävä työtä, koska lämpö ei siirry itsestään kuumempaan päin. Tämän toteuttamiseksi on olemassa lukuisia erilaisia avoimia ja jatkuvia prosesseja. Avoimet prosessit ovat palautumattomia. Tuttu esimerkki jäähdyttävästä avoimesta prosessista on jään sulaminen. Jatkuvat prosessit ovat kiertoprosesseja, jotka palaavat jatkuvasti alkutilaansa. Näitä prosesseja on kehitetty lukuisia, ja monet niistä perustuvat kaasujen ominaisuuksiin. Paisuntakiertoprosessit, kaasun nesteytykseen ja erotukseen sekä höyrystymiseen perustuvat prosessit ovat tällaisia. Mainitsemisen arvoisia jäähdytyskiertoprosesseja ovat myös sorptioprosessit ja lämpösähköilmiöt. (Aittomäki 1988)

Tärkeimpänä edellä mainituista prosesseista tarkastelun kohteeksi otetaan höyrystysprosessi, joka on ylivoimaisesti yleisin ja tärkein jäähdytysprosessi nykyään kaikissa sovelluksissa ja siten myös siirrettävissä ilmastointilaitteissa. Höyrystysprosessissa siirretään lämpöä ympäristöstä kiertoaineeseen sitä höyrystämällä. Höyrystysprosessi tarvitsee toimiakseen kompressorin, joka puristaa kaasumaisen kiertoaineen korkeampaan paineeseen ja lämpötilaan. Tästä juontuu tällaisia laitteita yhtenäistävä nimitys kompressorijäähdytys. Kompressorijäähdytys on ehdottomasti yleisin jatkuvatoiminen jäähdytystekniikka. Sitä käytetään myös esimerkiksi jääkaapeissa ilmastointilaitteiden ohella. (Aittomäki 1988) Seuraavan luvun prosessiteorian esittelyn jälkeen siirrytään tarkastelemaan prosessiin tarvittavia laitteita ja niiden toimintaa.

2.1 Höyrystysprosessi

Höyrystysprosessin ideaalinen eli häviötön vertailuprosessi on käänteinen Rankine-prosessi. Käänteinen Rankine-prosessi voidaan yksinkertaistetusti selittää neljässä

vaiheessa. Kierto alkaa isentrooppisella puristuksella, jolloin kylläisenä höyrynä oleva kiertoaine lämmitessään tulistuu. Tätä seuraa lauhdutusvaihe, jolloin kiertonesteestä poistetaan lämpöä vakioaineessa ja sen nestepitoisuus kasvaa. Kolmannessa vaiheessa neste paisuu kuristusventtiilissä takaisin höyryksi. Viimeinen vaihe on höyrystäminen kiertoaineeseen lämpöä tuomalla, jolloin neste palaa kylläiseksi höyryksi. Tämä tapahtuu lauhtumisen tavoin vakioaineessa. Todellisessa prosessissa on aina häviöitä, mikä kiteytetyksi tarkoittaa, että käytännössä tällaisessa prosessissa mikään ei tapahdu isentrooppisesti, ilman lämpöhäviöitä eikä vakioaineessa. Täydellinen eristäminen on mahdotonta, joten lämpöä vuotaa aina jossain määrin ympäristöön tai ympäristöstä prosessiin. Kompressorin venttiileissä sekä putkissa, lauhduttimessa ja höyrystimessä syntyy painehäviöitä. Lisäksi kylläinen höyry voi tulistua jo ennen kompressorin höyrystimessä. (Aittomäki 1988)

Kuvista 1 ja 2 voi nähdä yksinkertaisesti ja karrikoidusti ideaalisen ja todellisen höyrystysprosessin eroja lämpötilan ja entropian sekä logaritmisien paineen ja entalpiain suhteen piirretyissä kuvaajissa. Kuvissa kaaren sisään jäävä alue esittää kiertoaineen kostean höyryn aluetta. Kaaren vasemmalla kiertoaine on täysin nestemäisessä ja oikealla täysin kaasumaisessa muodossa. Kaaren muoto riippuu käytettävästä kiertoaineesta. Nyt kuitenkin tarkastellaan prosessia yleisellä tasolla. Kuvassa 1 prosessi on kuvattu kuuden pisteen kautta. Välillä 1 - 2 on kompressorin isentrooppinen puristus ja välillä 2 - 5 isobaarinen lauhtuminen, josta väli 2 - 3 on tulistuksen poistoa ja 4 - 5 alijäähtymistä. Välillä 5 - 6 kiertoaine paisuu paisuntaventtiilissä. Piste 5 on ylimääräinen aiemmin selitettyyn verrattuna, koska alijäähtymistä ei välttämättä tapahdu. (Aittomäki 1988)

$$\varepsilon_t = \frac{h_1 - h_6}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

missä	ε_t	teoreettinen kylmäkerroin	[-]
	h_1	ominaisentalpia puristuksen alussa	[kJ/kg]
	h_2	ominaisentalpia puristuksen lopussa	[kJ/kg]
	h_6	ominaisentalpia höyrystymisen alussa	[kJ/kg]

Teho on entalpien muutoksen ja massavirran tulo yhtälön 2 mukaisesti. Tämän tiedon avulla voidaan laskea lauhduttimen, höyrystimen ja kompressorin tehot jos tekijät tunnetaan. Höyrystimen teho on samalla prosessin tuottama jäähdysteho. Ideaalisen prosessin (log p, h)-kuvaajasta voidaan nähdä, kuinka höyrystimen ja kompressorin tehojen summa on yhtä suuri kuin lauhduttimen teho. Todellisessa prosessissa tämäkään ei aivan pidä paikkaansa. (Aittomäki 1988)

$$P = \Delta h \cdot q_m \quad (2)$$

missä	P	teho	[W]
	Δh	entalpian muutos	[kJ/kg]
	q_m	massavirta	[kg/s]

Todellisen höyrystysprosessin kylmäkerroin on höyrystimessä tapahtuvan entalpien muutoksen suhde kompressorin ominaistyöhön. Höyrystimessä tapahtuva entalpien muutos vastaa kilogrammaa kiertoainetta kohden jäähdytettävästä kohteesta vastaanotettua lämpöenergiaa. Kompressorin ominaistyö taas on kompressorin tekemä työ kiertoainekiloa kohden eli entalpien muutos kompressorissa. Koska massavirta q_m on stationääritilassa sama kaikissa osissa järjestelmää, voidaan todellisen prosessin kylmäkerroin ilmaista myös tehojen avulla. Yhtälössä 3 kylmäkerroin on esitetty täten entalpien muutosten lisäksi myös jäähdystehon ja kompressorin ottotehon perusteella. Jäähdysteho tarkoittaa höyrystimen sitomaa lämpötehoa. (Aittomäki 1988)

$$\varepsilon = \frac{\Delta h_H}{w_K} = \frac{\Phi_H}{P_K} \quad (3)$$

missä	ε	todellisen prosessin kylmäkerroin	[-]
	Δh_H	entalpian muutos höyrystimessä	[kJ/kg]
	w_K	kompressorin ottama ominaistyö	[kJ/kg]
	Φ_H	höyrystimen lämpöteho	[kW]
	P_K	kompressorin ottoteho	[kW]

Höyrystysprosessin todellinen tehokerroin voidaan laskea ideaalisen pohjalta, jos tunnetaan kompressorin isentrooppihyötysuhde ja mekaaninen hyötysuhde sekä käyttömoottorin hyötysuhde. Isentrooppihyötysuhde kuvaa kompressorin puristuksen poikkeamaa isentrooppisesta puristuksesta. (Aittomäki 1988)

$$\varepsilon = \eta_s \eta_{mk} \eta_m \varepsilon_t \quad (4)$$

missä	η_s	isentrooppihyötysuhde	[-]
	η_{mk}	kompressorin mekaaninen hyötysuhde	[-]
	η_m	moottorin hyötysuhde	[-]

2.2 Kompressorijäähdytyksen tekniikka

Kompressorijäähdytyksessä laitteisto koostuu yksinkertaisessa tapauksessa edellä esitellyn mukaisista komponenteista, jotka ovat kompressorin, lauhdutin, paisunta-venttiili ja höyrystin. Lisäksi prosessiin tarvitaan kiertoaine ja sille putkisto. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan lyhyesti näiden olennaisien komponenttien tyypillisiä ominaisuuksia.

2.2.1 Kompressorit

Mäntäkompressori on vanhin kompressorityyppi, mutta edelleen yleisesti käytössä muun muassa jäähdytyslaitteissa. Muita jäähdytystekniikan kannalta maininnan arvoisia kompressorityyppejä ovat ruuvi-, kiertomäntä-, turbo- ja lamellikompressorit, sekä erityisesti ilmalämpöpumppujen myötä yleistynyt hiljainen scroll- eli kierukkakompressori. Äänekkyuden lisäksi kompressorityyppi vaikuttaa laitteen kestävyyteen ja säädettävyyteen. Kompressorin kestävyyteen vaikuttaa kierrosnopeus, lämpötilat ja voitelu. Turbo- eli keskipakokompressoreja ja ruuvikompressoreja käytetään vain erittäin suurissa laitteissa. (Aittomäki 1988)

Kompressorit jaetaan tyyppin lisäksi koteloinnin perusteella. Jos kompressori ja sen käyttömootori ovat tiiviin yhtenäisen suojakuoren sisällä, on kompressori hermeettinen jos suojakuorta ei ole tehty avattavaksi. Tällaisten kompressorien vuotovaara on hyvin pieni, mutta huoltaminen lähes mahdotonta. Hermeettiset kompressorit ovat yleensä teholtaan pieniä. Avattavissa oleva suojakuori tekee kompressorista puoliermeettisen. Tämä helpottaa huoltoa, mutta lisää vuotovaaraa. Avoimissa kompressoreissa moottori ja kompressori ovat erillisiä yksiköitä, jotka yhdistetään voimansiirrolla. Vuotovaara kasvaa entisestään, mutta hermeettisyyden toteuttaminen voi olla liian haastavaa erityisesti suurille kompressoreille. (Seppänen 1996)

Kompressorin säädettävyys on tärkeää, kun käyttöalue on vaihteleva ja jäähdytystehon tarve vaihtelee. Karkein ja yksinkertaisin jäähdytyksen säätötapa on kompressorin sammuttaminen ja käynnistäminen, mikä rasittaa kompressoria suuresti. Tämä tapa on kuitenkin erittäin yleinen, koska se on halvin keino, sillä kompressoria ei varsinaisesti siinä säädetä. Varsinaisista kompressorin säätökeinoista kierrosnopeussäätö on yleisin, sillä se toimii kaikilla kompressorityypeillä. Kierrosnopeussäätö tuottaa kustannuksia, koska tällöin kompressoria ajavan moottorin tulee olla säädettävissä. Säädon voi toteuttaa myös esimerkiksi päästämällä paineistettua kaasua virtaamaan hallitusti takaisin alemman paineen puolelle. Lisäksi erilaisilla kompressoreilla on tyyppikohtaisia säätötapoja. Esimerkiksi monisynterisen mäntäkompressorin sylintereistä osa voi olla käytön aikana lepuutuksessa. (Aittomäki 1988)

2.2.2 Kiertoaineet

Jäähdytykseen käytettyjä höyrystysprosesseja tarkastellessa kiertoainetta voidaan kutsua kylmäaineeksi, mutta koska samoja aineita käytetään myös lämmitykseen tarkoitetuissa sovelluksissa, on johdonmukaisempaa käyttää nimitystä kiertoaine. Kiertoaine on prosessin ydin ja siksi sen ominaisuudet ovat tärkeitä. Aittomäki (1988) esittelee ideaalisen kiertoaineen ominaisuuksia monipuolisesti. Tällaisia tärkeitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi fysikaaliselta kannalta suuri höyrystymislämpö, jolloin pieni massavirta riittää, pieni painesuhde ja viskositeetti sekä hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Pieni viskositeetti tarkoittaa alhaisia painehäviöitä. Höyrystymispaineen tulisi olla yli yhden baarin normaaleissa lämpötiloissa alipaineen aiheuttaman ilman sisäänvuodon välttämiseksi ja lauhtumispaineen sopivan alhainen laitteiston painekestävyyden kannalta. Ideaalinen kiertoaine on myös kemiallisesti stabiili ja palamaton sekä myrkytön ja haitaton. (Aittomäki 1988)

Mikään kiertoaine ei luonnollisesti voi täyttää ideaalisen kiertoaineen vaatimuksia, vaan käytettävä aine valitaan tapauskohtaisesti mahdollisimman hyvin tarkoitukseen sopivaksi. Lisäksi erityisesti jos kiertoainetta tarvitaan paljon, on sen hinta yksi ratkaiseva tekijä valinnan kannalta. Muita huomioon otettavia seikkoja löytyy paljon. Kiertoaine ei saa olla haitallista jäähdytyskoneistolle. Hyvä kiertoaine myös liuottaa vettä ja öljyä, mutta niiden pääsemistä kiertoaineen sekaan on vältettävä. Vapaa vesi kierrossa jäätyy erityisesti paisuntaventtiilissä aiheuttaen jopa tukoksia ja voi johtaa vakavaan korroosioon varsinkin kierron lämpimässä osuudessa. Paremmiin vettä liuottavan kiertoaineen kanssa ongelma on vähäisempi. Kompressoria voitelevan öljyn sekoittuminen kiertoaineeseen, mahdollinen liukeneminen ja vaahdottuminen ovat kaikki riippuvaisia käytettävän öljyn ohessa myös kiertoaineesta. Öljy, veden lailla, kiertoaineen seassa vaikuttaa sen ominaisuuksiin ja kiertoprosessiin. Lisäksi öljyn sekoittuminen kiertoaineeseen voi vaarantaa kompressorin voitelun. (Aittomäki 1988)

Kaikki edellä esiteltyt ja monet muut kiertoaineen kannalta tärkeät ominaisuudet tulee ottaa huomioon, kun valitaan tunnettuun prosessiin sopivaa kiertoainetta. Valinnassa erityisen tärkeässä roolissa ovat lämpötilatasot, sillä kiertoaineen painetasot määräytyvät niiden perusteella ja vaikuttavat paljon erityisesti prosessin tehokertoimeen. Hyvällä tehokertoimella prosessissa toimivista kiertoaineista valinta tehdään muiden ominaisuuksien ja ympäristöarvojen perusteella.

Monet prosessien kannalta erittäin toimiviksi todetut kiertoaineet, kuten CFC- ja HCFC-yhdisteet, ovat kiellettyjä niiden otsonikatoa ja kasvihuoneilmiötä voimistavien ominaisuuksiensa tähden. Nykyään käytössä on paljon HFC-yhdisteitä, mutta niillekin haetaan korvaajia, koska ne ovat voimakkaita kasvihuonekaasuja. Erityisesti kotitalouslaitteissa ollaan siirtymässä pelkästään HC-yhdisteiden käyttöön, koska pienissä määrin käytettyinä niiden paloherkkyydestä ei ole vaaraa. Esimerkiksi ammoniakki ja hiilidioksidi eivät myöskään ole haitallisia otsonikerroksen tai ilmastonmuutoksen kannalta. Ammoniakki on kuitenkin myrkyllinen ja palava neste ja sitä käytetään lähinnä isoissa kylmälaitoksissa. Hiilidioksidi oli yksi ensimmäisistä käytetyistä kylmäaineista 1800-luvulla ja nykyään sen käyttöä tutkitaan monien uusien vaihtoehtojen ohella. (Aalto 2008)

2.2.3 Höyrystimet ja lauhduttimet

Höyrystimet ja lauhduttimet ovat jäähdytysprosessissa käytännössä lämmönsiirtimiä prosessin ja jäähdytyskohteen sekä prosessin ja lämpönielun välillä. Höyrystimessä kiertoaine nimensä mukaisesti höyrystyy siihen jäähdytettävästä kohteesta otettavan lämmön avulla, koska kiertoaine on kosteana höyrynä huomattavasti kohdetta kylmemmässä lämpötilassa. Lauhduttimessa taas prosessin lämpöä puretaan lämpönieluun kompressorilla tuotetun paineistuksen kautta huomattavasti korkeampaan lämpötilaan nostetusta kiertoaineesta. Lauhdutuksessa kiertoaine lauhtuu nestemäiseksi. (Aittomäki 1988) Jäähdytyksen kohde on yleensä jokin tila ja sen sisältö, kuten huoneen ilma sekä esineet ja ihmiset huoneessa. Erikoistapauksissa saatetaan jäähdyttää pelkkää ainetta eli esimerkiksi säiliössä olevaa nestettä. Lämpönielunakin saattaa toimia neste,

mutta useimmiten lämpö siirretään ulkoilmaan. Yleisellä tasolla voidaan lämmönsiirrossa puhua fluideista, kun kyse on liikkuvasta kaasusta tai nesteestä (Incropera et al. 2006).

Riippuu täysin lämmönsiirtoon osallistuvista fluideista, millaisia lämmönsiirtimiä prosessin höyrystin ja lauhdutin tyypiltään ovat. Erittäin tavallista kuitenkin on, että molemmat ovat suoria rekuperatiivisia lämmönsiirtimiä. Tällöin lämmönsiirto tapahtuu siis suoraan fluidilta toiselle niitä erottavan materiaalin läpi. Tämä materiaali on usein jokin metalli, kuten teräs hyvän lämmönjohtavuutensa takia. Epäsuora rekuperatiivinen lämmönsiirrin siirtää lämmön välittävän aineen kautta ja regeneratiivinen lämmönsiirrin taas varastoi lyhytaikaisesti siirrettävän lämmön. Näitä kahta käytetään kompressorijäähdytysprosesseissa harvoin. Lisäksi kun höyrystimen lämmönsiirto on suorasti rekuperatiivista eli se ottaa lämmön suoraan tilasta, kutsutaan tätä suoraksi höyrystymiseksi. (Seppänen 1996)

Tyypillisesti kiertoneste virtaa putkistossaan prosessista riippumattomalla tavalla, mutta se miten lämmönsiirto putkien ulkopuolella tapahtuu, vaikuttaa siirtimen rakenteeseen. Lämmönsiirto tapahtuu pääasiassa täysin konvektion eli kuljettumisen avulla. Kun lämmönsiirtonesteen virtauksen saa aikaan jokin ulkopuolinen voima on kyseessä pakotettu konvektio. Esimerkiksi ilmaa kannattaa liikuttaa puhaltimilla, koska vapaassa konvektiossa seisovaan ilmaan lämmönsiirtyminen olisi tehotonta. Virtauksien väliset suunnat vaikuttavat myös lämmönsiirtoon. Lämmönsiirrin voidaan toteuttaa myötä-, vasta- tai ristivirtauksella. Näistä vastavirtaus, virtausten vastakkaissuuntainen liike, tuottaa yleensä parhaan hyötysuhteen. Ristivirtaus on kuitenkin höyrystimissä ja lauhduttimissa erittäin yleinen, koska putkisto täytyy tehdä mutkittelevaksi lämmönsiirtopinta-alan kasvattamiseksi. (Incropera et al. 2006)

Lämmönsiirtopinta-alaan on helppo tehdä merkittäviä muutoksia suunnittelussa ja siksi se onkin erittäin tärkeä tekijä lämmönsiirrossa lämmönläpäisyluvun ja lämpötilaeron ohella. Tätä havainnollistaa lämmönsiirtimen tehon kaava yhtälössä 5. Yhtälössä lämpötilaerona käytetään keskimääräistä lämpötilaeroa, joka usein pohjautuu logaritmiseen keskilämpötilaeroon, koska sen käyttäminen soveltuu risti- ja

vastavirtalämmönsiirtimiin. Keskimääräisen lämpötilaeron ratkaisuun on olemassa tapauskohtaisia kaavoja ja kuvaajia, kuten edellä mainitun logaritmisien keskilämpötilaeron kaavat. (Incropera et al. 2006)

$$q = U A \Delta T_m \quad (5)$$

missä	q	lämmönsiirtoteho	[W]
	U	kokonaislämmönläpäisy-luku	[W/m ² K]
	A	lämmönsiirtopinta-ala	[m ²]
	ΔT_m	keskimääräinen lämpötilaero	[K]

Lämmönsiirtopinta-alaa voidaan lisätä edellä mainitun mukaisesti putkien pituutta mutkittelulla lisäämällä, mutta myös rivoituksella. Rivoitus tarkoittaa käytännössä putkiin eri tavoin kiinnitettyjä ohuita levyjä, jotka johtavat hyvin lämpöä fluidien välillä ja siten kasvattavat lämmönsiirtopinta-alaa ja lämmönsiirtotehoa. Usein höyrystimet ja lauhduttimet koostuvat levymallisista rivoista sekä niitä läpäisevistä ja muutoin koskettavista putkista. Levyjen läpi saattaa kulkea vain yksi putki mutkitellen tai useampia haarautuneita putkia. Putket voivat olla yhdessä tai useammassa tasossa virtaussuunnan suhteen. Tällaisia rakenteita voidaan yleisesti kutsua lamellipattereiksi ja ne ovat yleisiä erityisesti puhallinta käyttävissä ratkaisuissa. Vesilauhduksissa ratkaisuissa kaksoisputkirakenteet ovat tavallisia. Niissä fluidit kulkevat sisäkkäin. Niissäkin voidaan käyttää rivoitusta ja monia muita sovelluksia, kuten moniputkisia rakenteita. (Incropera et al. 2006)

2.2.4 Säätötekniikka ja paisuntaventtiilit

Höyrystyskoneistoa voidaan säädön puolesta automatisoida monin tavoin. Tarkoituksen mukaisen toiminnan varmistamisen lisäksi voidaan säätölaitteilla välttää laitteiston rikkoutuminen. Aiemmin mainittiin, että kompressorin käyttöä säätämällä voidaan vaikuttaa jäähdytystehoon. Tämä liittyy lämpötilasäätöön, jolla pidetään jäähdytettävän kohteen lämpötila halutunmukaisena. Lisäksi voi olla tarpeen säätää kylmäainevirtaa

esimerkiksi siten, ettei höyrystimelle päästetä enempää kiertoainetta kuin siellä ehtii höyrystyä. Nämä säädöt on mahdollista tehdä paisuntaventtiilin avulla. Varolaitteita kompressorijäähdytyslaitteessa saatetaan tarvita esimerkiksi lämpötila- ja painetasojen tarkkailuun. Myös esimerkiksi moottorin ylikuumenemissuoja on hyvin yleinen varolaite. (Aittomäki 1988)

Paisuntaventtiilin tarkoitus on antaa kiertoaineen paisua höyryksi ja rajoittaa ainekiertoa. Virtauksen kuristaminen johtaa suurempaan virtausnopeuteen, mikä taas tarkoittaa matalampaa painetta. Kompressorin imupuoli pitää paineen alhaisella tasolla. Lauhduttimessa nesteeksi tiivistynyt korkeapaineinen kiertoaine muuttuu paisuntaventtiilissä paisuessaan kosteaksi höyryksi. Höyrystimelle tuleva kiertoaine on siis nesteen ja höyryn sekoitus. Paisuntaventtiileitä on useita eri tyyppisiä erilaisilla ominaisuuksilla. (Aittomäki 1988)

Aittomäki (1988) esittelee neljä erilaista kiertoaineen virtauksen säätöön sopivaa paisuntaventtiilin tehtävään sopivaa laitetta, jotka ovat paineohjattu- ja termostaattinen paisuntaventtiili, uimuriventtiilit sekä kapillaariputki. Paineohjattu paisuntaventtiili pyrkii pitämään höyrystimen paineen vakiona laitteiston kuormasta ja lämpötiloista huolimatta avaamalla venttiiliä vain, kun höyrystimen paine laskee määrätyn rajan alle. Termostaattinen paisuntaventtiili pyrkii pitämään höyrystimelle tulevan kiertoaineen määrän sopivana ohjautumalla höyrystimen alun ja lopun välisen lämpötilaeron perusteella. Tämän se tekee kompressorin imuputkeen sijoitetun lämpötila-anturin avulla, joka avaa paineohjatusti venttiiliä jouta vasten, kun lämpötilaero kasvaa liian suureksi. Uimuriventtiilit perustuvat nestemäisessä kiertoaineessa kelluvaan uimuriin, joka venttiilin toimintaperiaatteesta riippuen sulkee venttiilin joko nestepinnan noustessa tai laskiessa. Nestepinnan korkeus voi laskea esimerkiksi kiertoaineen höyrystyessä. Kapillaariputki on yksinkertaisesti ohut putki, sisähalkaisijaltaan 0,5 - 2 mm, jolla kiertoaineen virtausta kuristetaan. Yksinkertaisuudestaan huolimatta oikein mitoitettulla kapillaariputkella on kuitenkin itsesäätäviä ominaisuuksia sekä etuna myös paineiden tasoittuminen kompressorin seistessä, mikä helpottaa käynnistystä ja vähentää laitteiston kuormitusta seisonnassa. (Aittomäki 1988)

Venttiiliä valitessa tulee huomioida kiertoaine, tehoalue, paine-eroalue, höyrystymislämpötila-alue sekä lämpötila-alue, jolla tulistus on vakio. Jos lauhtumispaine nousee korkeammaksi, kuin mihin paisuntaventtiili on mitoitettu, on riskinä nesteen läpipääsy höyrystimelle. Lauhtumispaineen laskiessa mitoitettua alemmas seuraa höyrystyspaineen lasku ja tehon aleneminen. Jäähdytettävän kohteen lämpötilaa voidaan säätää termostaattisäädössä. Termostaattisäädöllä ohjatun kompressorin lämpötila-anturin sijoituspaikka tulee valita huolellisesti niin, että väärät lämpötilaerot eivät pääse vaikuttamaan ohjaukseen. (Aittomäki 1988)

3 SIIRRETTÄVÄT ILMASTOINTILAITTEET

Sana ilmastointi voidaan määritellä hyvin laveasti johdannossa esitellysti, mutta sanan ilmastointilaitte merkitys on vakiintunut tarkoittamaan ilmaa jäähdyttävää laitetta. Ilmastointilaitteilla pystyy toki yleensä poistamaan kosteutta sekä mahdollisesti myös lämmittämään ilmaa, mikä selittää laveaa termiä. Pelkästään ilmaa jäähdyttävä laite on ilmanjäähdytin, mutta tässä työssä puhutaan ilmastointilaitteesta, koska termiin sisältyy kosteuden poisto ominaisuutena. Jäähdytys toteutetaan useimmiten höyrystymisprosessilla, kompressorin avulla lämpöä pois siirtämällä. Tämä prosessi selitettiin edellisessä luvussa. Siirrettävät ilmastointilaitteet ovat yleensä siirrettävyyden mahdollistamiseksi varsin pieniä, mutta suuriakin siirrettäviä laitteita löytyy. Siirrettävien ilmastointilaitteiden kokoskaala on suunnilleen 2 – 20 kW jäähdytystehoja. Kotitalouskokoluokan laitteet ovat jäähdytysteholtaan yleensä alle 5 kW. Näillä laitteilla siirrettävyys syntyy jo pelkästään keveydestä ja useimmat laitteet liikkuvat kätevästi pyörillä. (Wikipedia 2013)

Siirrettävät ilmastointilaitteet ovat yleensä ilmajäähdytteisiä, mutta myös vesijäähdytteisiä malleja on olemassa. Seuraavat luvut esittelevät tällaisten laitteiden tyypillisiä ominaisuuksia. Koska luotettaviksi lähteiksi sopivia tieteellisiä artikkeleita ei tarpeeksi suurella kattavuudella ole saatavissa, perustuvat seuraavat tiedot markkinoilla olevien laitteiden tyypillisiin ominaisuuksiin. Lisäksi ilmajäähdytteisen ilmastointilaitteen ominaisuuksia tarkastellaan esimerkkilaitteena käytettävän laitteen avulla, jotta tekniikasta ja perusominaisuuksista saadaan luotua kattavampi kuva. Esimerkkilaitteen tarkastelu antaa samalla myös yleistä kuvaa kaikenlaisten jäähdytyslaitteiden tekniikasta, mutta erityisesti avaa siirrettävien ilmalauhdutteisten ilmastointilaitteiden tekniikkaa. Myöhemmin selitetään myös, miten vesilauhdutteinen laite poikkeaa ilmalauhdutteisesta.

3.1 Ilmalauhdutteinen siirrettävä ilmastointilaitte

Ilmalauhdutteisuus merkitsee sitä, että jäähdytyksen tuottama hukkalämpö siirretään ilmaan. Tämä yleensä tarkoittaa sitä, että lämpönieluna toimii ulkoilma. Siirrettävän

ilmastointilaitteen tapauksessa lauhduttimena toimivan lämmönsiirtimen läpi puhalletaan siinä lämpenevää ilmaa ulos. Tämä ilma voidaan ottaa ulkoa erillisellä letkulla, mutta yleensä se otetaan sisältä, mikä aiheuttaa alipaineisuutta tilaan. Tämä aiheuttaa korvausilman tarpeen, mikä on ongelmallista jäähdytyksen kannalta jos korvausilma on kuumaa. Korvausilman kuumuus voi johtua ulkoilman kuumuudesta tai pahimmillaan poistoilman palaamisesta tilaan. Kaksoisletkujärjestelmä, jossa toisella letkulla imetään jäähdytettävää ilmaa sisään ja toisella puhalletaan kuumennut ilma ulos, poistaa huoneen korvausilman tarpeen. Siinäkin on kuitenkin edelleen riski ulospuhallusilman palaamisesta laitteeseen. Lisäksi kahden letkun käyttö vaikeuttaa asennusta ja siirrettävyyttä. (Thomson 2007)

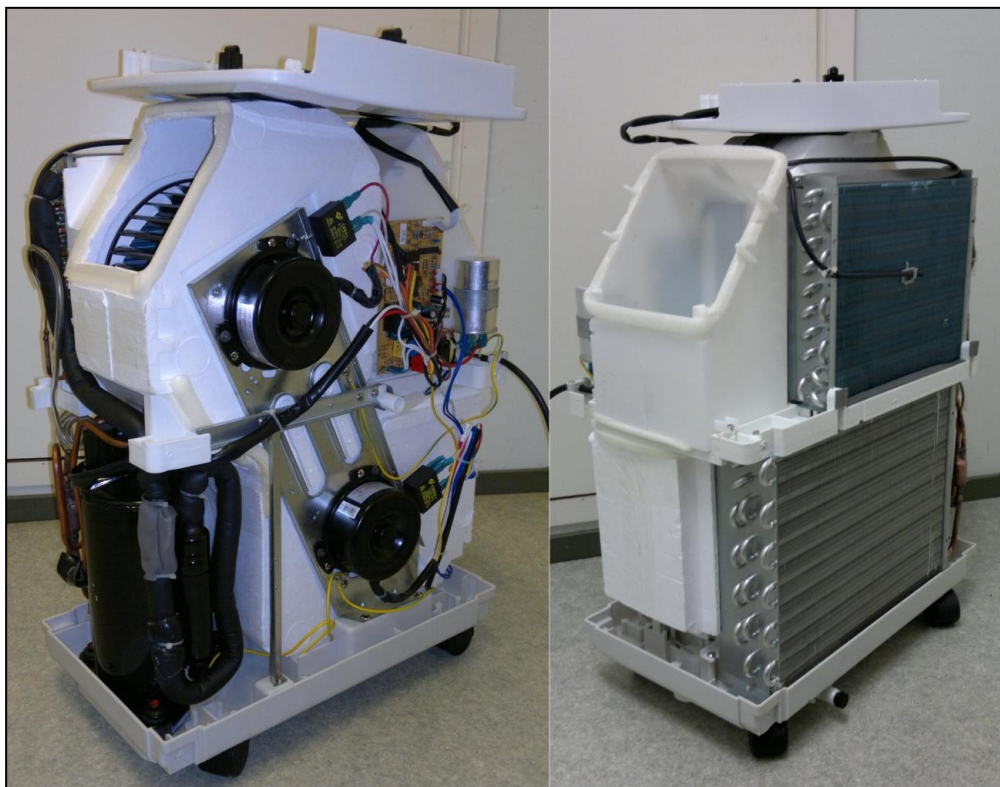
Tässä luvussa tarkastellaan ilmalauhduitteista ilmastointilaitetta esimerkin avulla. Esimerkkilaitteena toimii Domesto PRO9000BTU, joka on matalan hintaluokan ja tehon laite, mutta sisältää kuitenkin kaikki tyypilliset osat. Yksityiskohtaisempi tarkastelu on tarpeen, koska konkreettista laitetta luotettavampaa ja informatiivisesti yhtä kattavaa tietolähdettä ei ole helposti löydettävissä. Laitteen ominaisuuksia kuitenkin vertaillaan muihin markkinoilla oleviin laitteisiin, joista tietoa löytyy lähinnä jälleenmyyjiltä. Tämä tarkastelu tuo myös selvyyttä vesilauhduitteisten laitteiden toiminnasta, koska ne ovat suurimmaksi osin yhteneviä. Eroavaisuudet selvitetään luvussa 3.2. Kuvassa 3 on tarkasteltava Domesto-merkinen ilmastointilaitte vierekkäin käyttövalmiina ja avattuna. Kuvat on otettu suunnilleen samasta suunnasta laitteen etupuolelta. Käyttökuntoisen laitteen takaa lähtee poistoletku, jonka halkaisija on noin 15 senttimetriä ja pituus korkeintaan 1,5 metriä. Laitteen päällä on ohjauspaneeli ja sivussa ilmansuodattimet. Lisäksi liitteestä 1 löytyy kuvat kyseisen laitteen tunnuskilvistä ja ohjekirjan mukaisista teknisistä tiedoista.



Kuva 3: Domesto PRO9000BTU ilmastointilaitte vasemmalla käyttökuntoisena ja oikealla avattuna.

Laitteen muovikuoret purkamalla sai kaiken tärkeän helposti näkyville, eikä muuta olisi voinutkaan purkaa, koska komponentit ovat enimmäkseen kiinnijuotettuja. Laitteen etupuolen yläosassa on radiaalipuhallin, joka imee jäähdytettävää ilmaa läpi ylemmän lämmönsiirtimen, joka on siis jäähdytysprosessin höyrystin. Tämä puhallin puhalttaa jäähdytettyä ilmaa huonetilaan laitteen etupuolelta. Höyrystimeen on kiinnitetty sisäilman ja kiertoaineen lämpötiloja mittaavat elektroniset anturit. Edessä alhaalla näkyy kompressorin putkineen, joista vain osa on eristetty. Nähtävillä on myös kapillaariputki, joka toimii tämän laitteen paisuntaventtiilinä. Kapillaariputkea on pidennetty kiepittämällä sitä, mihin on oletettavasti syynä putkelle mitoituksen kannalta sopiva pituus. Alempana oleva isompi lämmönsiirrin on lauhdutin, jonka puhallin on laitteen takapuolen alaosassa. Lauhdutin on suurempi, koska sen täytyy luovuttaa poistoilmaan höyrystimen keräämän lämmön lisäksi kompressorin tuottama lämpö. Kompressorilta lauhduttimelle tuleva kiertoaineputki tekee myös ylimääräisen kiepin. Tähän on syynä todennäköisesti kompressorin aiheuttama värinä. Kompressorin värinä erityisesti käynnistyessään, mikä ravistaa myös putkia, mihin ylimääräinen kieppi antaa joustavuutta. Tällainen ratkaisu saattaa olla laitteen käyttöön kannalta erittäin merkityksellinen.

Höyrystimen mitat ovat 0,26 m leveyttä 0,21 m korkeutta ja 0,04 m syvyyttä. Lauhduttimen mitat puolestaan ovat 0,32 m leveyttä 0,25 m korkeutta ja 0,05 m syvyyttä. Molempien lamellijako on tiheä: seitsemän lamellia jokaista senttimetriä lämmönsiirtimen leveyttä kohden. Tämän perusteella höyrystimen lämmönsiirtopinta-ala on noin $3,06 \text{ m}^2$ ja lauhduttimen noin $5,6 \text{ m}^2$. Nämä on laskettu edellä lueteltujen mittojen mukaan olettaen lamellit äärettömän ohuiksi, jolloin vain sivut otetaan huomioon. Myöskään kiertoaineputkien pinta-aloja ei ole huomioitu. Lauhduttimen pinta-ala on siis lähes kaksinkertainen höyrystimeen nähden. Lisäksi lauhduttimessa kiertoaineputket kulkevat kolmessa tasossa ja höyrystimessä kahdessa. Molempien lämmönsiirtimien edessä on pestävä ilmansuodatin, joka estää lian pääsyn lämmönsiirtimeen. Kuvassa 4 näkyy kompressori toiselta suunnalta, puhallinmoottorit, elektroniikkaa sekä puretun laitteen takaosa.



Kuva 4: Purettu Domesto PRO9000BTU ilmastointilaitte kuvattuna vastakkaisilta sivuilta. Vasemmalla näkyy kompressori ja puhallinmoottorit, oikealla laite takaa.

Molemmat puhaltimet ja puhallinmoottorit ovat samanlaisia. Niitä ja kompressoria ohjaava elektroniikka näkyy kuvassa 4. Kuvissa 3 ja 4 laitteen päällä ylösalaisin olevalla ohjauspaneelilla hallitaan laitetta. Molemmissa kuvissa näkyy myös laitteen pohjaan muotoiltu kondenssivesiastia, jonka tilavuus on ohjekirjan mukaan puoli litraa. Lämmönsiirtimiin tiivistyvä vesi valuu alaspäin tälle astialle. Ilmavirtaus on ilmeisesti lämmönsiirtimien läpi tarpeeksi hidas, jotta vesi pystyy valumaan. Normaalikäytössä lauhdutin haihduttaa veden laitteen pohjalta. Jos vettä kertyy liian paljon, laitteen takaosassa pohjalla oleva koho nousee ja katkaisee laitteen virran, jolloin astia täytyy tyhjentää. Kosteutta ilmasta poistettaessa veden annetaan valua ulos laitteen ylemmästä tyhjennysaukosta, jolloin se ei pääse valumaan lauhduttimelle haihtumaan, kuten normaalikäytössä. Oletettavasti merkittävä osa laitteen haihduttamasta vedestä kuitenkin poistuu ulospuhallusputken kautta normaalikäytössä, joten kosteutta poistuu tilasta silloinkin.

Tarkasteltu laite on hyvin tyypillinen. Se on hyvin samanlainen verrattuna esimerkiksi Spinea Oy:n (2013) markkinoimiin tuotteisiin, joissa kaikissa on myös radiaalipuhaltimet ja sama kiertoaine R410A. Kaikki puhaltavat letkun avulla kuumaa ilmaa ulos ja voivat poistaa kosteutta. Tarkastellun laitteen kompressorityyppiä ei kyetty varmistamaan, koska siitä ei löytynyt tietoa eikä kompressoria voinut avata, koska se on hermeettinen. Kyseessä on kuitenkin hyvin suurella todennäköisyydellä kiertomäntäkompressori. Tämä yleinen kompressorityyppi on käytössä kaikissa Spinea Oy:n (2013) markkinoimissa siirrettävissä ilmastointilaitteissa.

3.2 Vesilauhdutteisat siirrettävät ilmastointilaitteet

Vesilauhdutteisuus tarkoittaa veteen lauhduttamista. Tällöin ilmastointilaitteen lauhdutin purkaa lämpönsä veteen ilman sijaan. Lämmönsiirrin lauhdutuspuolella on tällöin erilainen, eikä esimerkiksi toista puhallinta tarvita. Muuten laitekoonpano vastaa edellisessä luvussa esiteltyä ilmalauhdusteista ja prosessikin on vastaava. Vettä käytettäessä veden tulolämpötila lauhduttimelle on tosin todennäköisesti kylmempää, koska vesijohtovesi on huoneilmaa selvästi kylmempää. Tämä on etu, kuten sekin, että

vettä tarvitaan huomattavasti vähemmän sen korkean ominaislämpökapasiteetin ansiosta. Toisaalta taas vesijohtovesi on erittäin kallista - varsinkin ilmaan verrattuna. Lisäksi veden tuominen laitteelle on haastavampaa kaikkialta löytyvään ilmaan verrattuna. Hyödyt kasvavat kuitenkin haittoja merkittävimmiten vesilauhdutteisessa jäähdytyksessä, kun jäähdytykselle on tarvetta, mutta tilassa ei ole mahdollisuutta käyttää ilmalauhdutteista ilmastointilaitetta. Lisäksi vesilauhdutteinen laite ei soke ilmanvaihdon tasapainoa, sillä se ei muuta huoneen painetasoa.

Markkinoilta löytyy vesilauhdutteisia laitteita, kuten Polaria MCW12, ratkaisuksi edellä mainittuihin ilmalauhdutteisten laitteiden ongelmiin. Kuitenkin veden laitteelle tuomisen hankaluuden välttämiseksi Polaria MCW12 on kiinteäasenteinen (Scanoffice 2012). Siirrettäviä vesilauhdutteisia ilmastointilaitteitakin löytyy, mutta niiden liikuttelua rajaa jäähdytysveden tulon ja poiston tarve. Siinä missä ilmalauhdutteisen on poistettava kuuma ilma ulos, on vesilauhdutteisella laitteella aina oltava molemmat vesiliitännät. Vesiletkut ovat toki ilmaletkuja pienempiä ja helpommin jatkettavissa, joten pelivaraa on tilankäytöllisesti enemmän. Lisäksi vesilauhdutteinen laite tarvitsee vähemmän tilaa ympärilleen, koska se tarvitsee vain yhden ilmanoton ja -poiston.

Todennäköisesti juuri veden jäähdytykseen käyttämisen kalleuden takia esimerkkejä siirrettävistä vesilauhdutteisista ilmastointilaitteista löytyy parhaiten Yhdysvaltojen markkinoilta. Esimerkiksi KwiKoolilla (2012) on valikoimissaan kymmenen laitetta, jotka ovat pääasiassa tehoiltaan ja kustannuksiltaan moninkertaisia aikaisemmin esiteltyyn ilmalauhdutteiseen laitteeseen verrattuna. Valmistajan pienin malli KWIB1411 kuitenkin tuottaa vain hieman suuremmalla ottoteholla yli 50 % suuremman jäähdytystehon, mutta on yli kymmenen kertaa kalliimpi ja painaa suunnilleen kolme kertaa enemmän kuin Domesto PRO9000BTU. Se käyttää kiertoainetta R421A ja voi enimmillään käyttää jopa 680 litraa vettä tunnissa. (KwiKool 2012) Hintojen ja mittojen perusteella nämä KwiKoolin vesilauhdutteiset ilmastointilaitteet on tarkoitettu lähinnä teollisuuskäyttöön.

Seppänen (1996) kertoo vesilauhduttimen hyväksi puoliksi tehokkuuden ja pienikokoisuuden. Muita mainittavia etuja ovat edullisuus ja toimintavarmuus. Lisäksi

vesilauhdutin on jäätyminen suhteen toimintavarma. Kiertoaineputkisto on myös lyhyt, joten painehäviöt jäävät pieniksi. Lisäksi vesilauhdutteiset laitteet ovat tavallisesti hiljaisia. (Seppänen 1996)

Seppänen (1996) esittää vesilauhduttimen tyypilliseksi rakenteeksi putkilämmönsiirrintä, jonka sisällä vesi virtaa putkissa ja prosessin kiertoaine lauhtuu nesteeksi vesiputkien ulkopinnoille lämmönsiirtimen sisällä. Kuuma kaasumainen kiertoaine siis luovuttaa lämpöään läpivirtaavalle vedelle, nesteytyy ja valuu lauhduttimen pohjalle. Pienempänä ratkaisuna voisi toimia esimerkiksi kierteytetty sisäkkäinen kaksoisputkirakenne, jossa sisempänä virtaa vesi ja ulompana kiertoaine. Tällöin kiertoaine lauhtuisi myös kylmän vesiputken pinnalle, mutta rakenne olisi yksinkertaisempi ja pienempi. Materiaalit, lämpötilat ja virtausnopeudet määrittävät lauhduttimen koon, jolla saavutetaan vaadittu lauhdutusteho.

4 VESILAUHDUTTEISEN SIIRRETTÄVÄN ILMASTOINTILAITTEEN MITOITUS

Tässä luvussa tehdään yksinkertaistettu teoreettinen mitoitus siirrettävälle vesilauhdutteiselle ilmastointilaitteelle, jonka lämpönieluna käytetään vesiastiaa. Astiaa käyttämällä on tarkoitus luoda laitteelle entistä monipuolisemmat mahdollisuudet siirrettävyyden kannalta. Samalla saavutetaan myös tavallisen vesilauhdutteisen laitteen hyödyt eli laite ei vaikuta tilan painetasoon. Lisäksi laitteen vesiastia on samalla hyödynnettävissä kondenssiveden poistoon. Haittapuolena on tarve veden manuaaliselle vaihtamiselle laitteeseen.

Mitoitettavalle laitteelle määritetään ensimmäiseksi lämpötilatasot, joihin kuuluvat käyttötarkoitukseen sopivien veden ja ilman lämpötilojen lisäksi niihin perustuvat kiertoprosessin lämpötilat. Tämän jälkeen määritetään sopiva kiertoaine prosessiin lämpötilojen ja luvussa 2.2.2 esitettyjen seikkojen pohjalta. Valitun kiertoaineen ja sen lämpötilojen pohjalta voidaan esitellä kiertoprosessi. Kiertoprosessin pohjalta taas voidaan valita sopiva kompressori ja paisuntaventtiili. Lopuksi määritetään laitteelle sopivat lämmönsiirtimet höyrystimeen ja lauhduttimeen.

4.1 Lämpötilatasot

Valitaan käyttötarkoitukseen sopivat lämpötilat kiertoprosessiin. Oletetaan, että ilma jäähdytetään lämpötilasta 30 °C lämpötilaan 20 °C ja vesi astiassa lämpiää lämpötilasta 10 °C lämpötilaan 40 °C. Lisäksi määritetään veden massaksi 10 kg, jolloin se on helposti kuljetettavissa. Tällöin vettä on astiassa noin 10 litraa ja astian koko on hieman tätä suurempi, jotta kuljetus onnistuu ja kondenssivesi mahtuu astiaan. Kiertoaineen lämpötilan on siis oltava höyrystimellä alle 20 °C ja lauhduttimella yli 40 °C, jotta prosessi voisi toimia. Lämpötilaeron täytyy toki olla korkeampi, jotta lämmönsiirto toimii sujuvasti. Liian korkea lämpötilaero johtaa kohtuuttoman suureen paine-eroon, joka kuormittaa laitteistoa ja vaatii kompressorilta paljon työtä. Molempiin valitaan

pienimmillään kymmenen celsiusasteen suuruinen lämpötilaero. Kiertoaine on siis höyrystimellä lämpötilassa 10 °C ja lauhduttimella 50 °C.

4.2 Kiertoaine

Valitut prosessitiedot Coolpack-nimiseen ohjelmaan syöttämällä voi tarkastella esimerkiksi prosessin tehokertoimia lukuisilla eri kiertoaineilla. Parhaat tehokertoimet antoivat useat jo kielletyt kiertoaineet kuten R12, mutta yksi parhaimmista saatiin propaanilla, jonka tunnus on R290. Propaani kuuluu nykyään hyväksyttäviin HC-yhdisteisiin, se ei aiheuta otsonikatoa ja sen vaikutus kasvihuoneilmiöön on pieni (Aalto 2008). Propaani on siis hyvin soveltuva valinta teoreettiseen mitoituskeinoon. Propaania kiertoaineena käyttävän pienen kokoluokan ilmastointilaitteen valmistaminen vaatisi todellisuudessa tarkempaa harkintaa, koska sen käyttö on tutkimusasteella ja sitä käytetään nykyään lähinnä kookkaammissa kylmälaitoksissa (Aalto 2008). Lisäksi propaanin käytön kannalta merkittävä asia on se, että se on palava kaasua. Hajuttomana ja värittömänä kaasuna propaani voi ilmaan vuotaessaan aiheuttaa riskin tulipalosta täysin huomaamatta (IFA 2013).

Propaanin höyrystymispaineet ovat myös erittäin sopivat valituissa lämpötiloissa. Kostean höyryn alueella lämpötilassa 10 °C kylläisen propaanin paine on 6,3 bar ja lämpötilassa 50 °C 17,1 bar. Paineen nousu ei siis ole valtava, joten kompressorilta ei vaadita erityistä kestävyyttä tai tehoa. Lisäksi laitteen muut osat eivät ole merkittävässä kuormituksessa laitteen käydessä tai levossakaan, sillä huomattavasti korkeammat paineet ovat täysin tavallisia. Aikaisemmin tarkastellun ilmalauhdutteen esimerkkilaitteen (Domesto PRO9000BTU) korkein käyttöpaine on peräti 55 bar. Nyt mitoitettavan laitteen alin paine 6,3 bar on lisäksi selvästi yli ilmakehän paineen, joten sisäänvuodon mahdollisuutta ei ole.

4.3 Kiertoprosessi

Lämpötilan nousu vesiastiassa tekee tällaisen laitteen kiertoprosessin suunnittelusta hankalan, koska prosessi ei ole milloinkaan stationääritilassa. Veden lämmitessä lämmönsiirto lauhduttimella kiertoaineesta veteen heikentyy, jolloin kiertoaine jäähtyy entistä vähemmän. Tällöin kiertoaineeseen on sidottavissa vähemmän lämpöä höyrystimellä. Prosessin jäähdytysteho laskee puristustyön säilyessä samana, jolloin myös tehokerroin laskee. Tämän takia kiertoprosessi ratkaistaan kolmessa tilanteessa, veden ollessa 10 °C, 25 °C ja 40 °C, olettaen tilanteet hetkellisesti stationäärisiksi. Veden lämpötila 25 °C käsitellään prosessin keskimääräisenä tilana. Prosessin lämpötilatasot ja kiertoaine on nyt määritetty. Näiden lisäksi valitaan kompressorille teho 200 W isentrooppihyötysuhteella 60 %, joka on realistinen arvio kompressorille.

Prosessilaskennan mahdollistamiseksi ilman kohtuuttoman tarkkaa selvitystyötä käytetään muutamia yksinkertaistuksia, joista huolimatta tuloksien voidaan olettaa olevan järkeviä. Kompressorin oletetaan olevan ainoa häviöllinen komponentti edellä mainitun isentrooppihyötysuhteen verran. Täten missään laitteen osassa ei oleteta tapahtuvan esimerkiksi painehäviöitä. Höyrystimelle valitaan kahden celsiusasteen suuruinen tulistus, millä varmistetaan, ettei kompressorin mene höyryä. Lisäksi oletetaan, että lämpö siirtyy kiertoaineen ja veden välillä lauhduttimessa samalla teholla huolimatta kiertoaineen olomuodosta. Yhtälöön 5 pohjautuen tämä tarkoittaa, että kokonaislämmönläpäisy-lukukin on vakio olomuodosta huolimatta. Koska lämmönsiirtimen pinta-ala on vakio, vaikuttaa lämmönsiirron tehokkuuteen ainoastaan keskimääräinen lämpötilaero. Tämän oletuksen perusteella lauhduttimen teho on suoraan riippuvainen keskimääräisestä lämpötilaerosta.

Coolpack-ohjelman avulla prosessipisteiden tarkastelu onnistuu nopeasti ja tarkasti. Aloitetaan tarkastelemalla alkutilannetta, jossa vesi on 10 °C lämpötilassa. Koska prosessi on hyvin yksinkertaistettu, tarkastellaan prosessia vain neljän pisteen kautta. Pisteessä 1 höyrystimen jälkeen kiertoaine on tulistunut lämpötilaan 12 °C, jolloin entalpia on 589 kJ/kg. Mikäli puristus tapahtuisi isentrooppisesti, saadaan entropiakäyrää seuraamalla pisteen 2s entalpiaksi 634,5 kJ/kg lauhduttimen paineessa

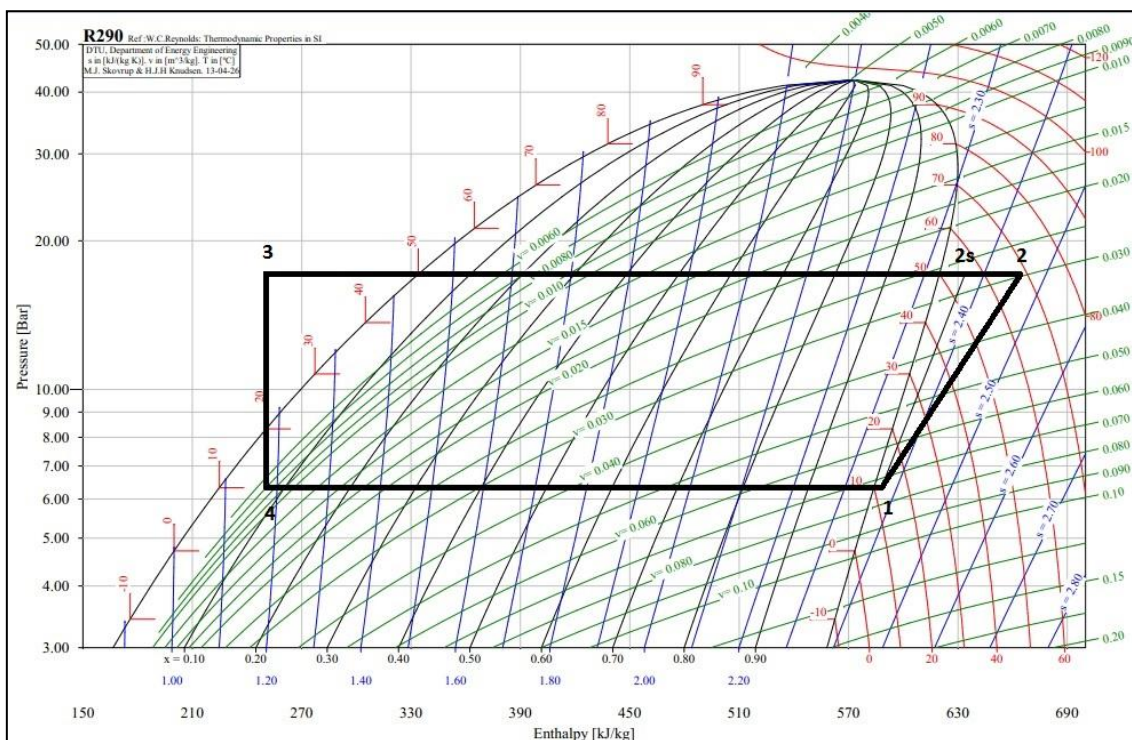
17,1 bar. Todellinen entalpia puristuksen isentrooppihyötysuhteen huomioiden on laskettu yhtälön 6 mukaisesti.

$$\eta_s = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_s} + h_1 \quad (6)$$

missä	η_s	isentrooppihyötysuhde	[-]
	h_{2s}	entalpia isentrooppisen puristuksen jälkeen	[kJ/kg]
	h_1	entalpia ennen puristusta	[kJ/kg]
	h_2	entalpia todellisen puristuksen jälkeen	[kJ/kg]

$$h_2 = \frac{634,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 589 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{0,6} + 589 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 664,83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Entalpiaksi pisteessä 2, kun puristuksen isentrooppihyötysuhde otetaan huomioon, saadaan 664,8 kJ/kg. Tällöin kiertoaineen lämpötila on korkeimmillaan 68,6 °C. Jäähtyessään lauhduttimella kiertoaine poistuu tulistetulta alueelta entalpiassa 620 kJ/kg ja lauhtuu kokonaan nesteeksi entalpiassa 334 kJ/kg. Oletetaan, että kiertoaine alijäähtyy lämpötilaan 20 °C, jolloin sen paine on 8,33 bar ja entalpia 250,5 kJ/kg. Tältä pisteeltä 3 kiertoaine paisuu vakioentalpiassa höyrystimeen paineeseen 6,3 bar. Tämä on piste 4, jossa kiertoaine on kosteana höyrynä 10 °C lämpötilassa. Tästä se edelleen höyrystyy ja palautuu kiertoprosessin pisteeseen 1 ja prosessi alkaa uudelleen. Kuva 5 esittää kyseistä kiertoprosessia paineen ja entalpian suhteen. Paineen asteikko on logaritminen. Prosessipisteet on numeroitu edellä selostetun mukaisesti kuvaan.



Kuva 5: Propaanin kiertoprosessi lauhdutettaessa 10 °C veteen.

Seuraavaksi ratkaistaan lauhduttimen keskimääräinen lämpötilaero, joka siis saadaan tulistuksen poiston, lauhdutuksen ja alijäähdetyksen keskimääräisistä lämpötiloista entalpiaosuuksien avulla. Aiemmin on kerrottu tarpeellisten lämpötilojen ja entalpioiden arvot. Tulistuksen poistossa entalpia laskee 44,8 kJ/kg ja keskimääräinen lämpötilaero on 49,3 °C. Lauhdutuksessa entalpia laskee 286 kJ/kg ja lämpötilaero on vakio 40 °C. Alijäähdetyksessä entalpia laskee 83,5 kJ/kg ja keskimääräinen lämpötilaero on 25 °C. Entalpia laskee lauhduttimessa yhteensä 414,3 kJ/kg. Näiden tietojen perusteella keskimääräinen lämpötilaero lauhduttimen entalpiamuutosten perusteella on 38,0 °C. Tämän tiedon avulla hyödyntäen tehtyjä yksinkertaistuksia voidaan laskea keskimääräinen lämpötilaero minkä tahansa veden lämpötilan suhteen.

Määritetään seuraavaksi entalpiamuutos lauhduttimessa kun vesi astiassa on lämpötilassa 40 °C. Tätä varten tarvitaan keskimääräinen lämpötilaero tälle prosessin tilanteelle, joka on myös tuntematon. Alkuarvauksen 13 °C avulla saadaan yhtälöllä 7

ratkaistua entalpien muutos lauhduttimessa, koska sen oletetaan olevan suoraan verrannollinen keskimääräiseen lämpötilaeroon.

$$\Delta h_{L,v40} = \frac{\Delta T_{m,vesi40}}{\Delta T_{m,vesi10}} \cdot \Delta h_{L,v10} \quad (7)$$

missä	$\Delta h_{L,v40}$	entalpien muutos lauhduttimella, vesi 40 °C	[kJ/kg]
	$\Delta T_{m,v40}$	keskimääräinen lämpötilaero, vesi 40 °C	[°C]
	$\Delta T_{m,v10}$	keskimääräinen lämpötilaero, vesi 10 °C	[°C]
	$\Delta h_{L,v10}$	entalpien muutos lauhduttimella, vesi 10 °C	[kJ/kg]

$$\Delta h_{L,v40} = \frac{13 \text{ °C}}{37,98 \text{ °C}} \cdot 414,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 141,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Tulituksen poiston entalpien muutos säilyy samansuuruisena (44,8 kJ/kg), koska puristuskaan ei muutu, mutta keskimääräinen lämpötilaero siinä on 19,3 °C. Nyt lauhdutuksessa entalpia laskee vain 97,0 kJ/kg ja keskimääräinen lämpötilaero on 10 °C. Näillä lauhduttimen keskimääräiseksi lämpötilaeroksi saadaan 12,94 °C. Iteraatiota edelleen jatkamalla saadaan entalpien muutokseksi 141,3 kJ/kg ja lauhduttimen keskimääräiseksi lämpötilaeroksi 12,95 °C. Jos täysin sama laskenta tehdään prosessin keskimääräiselle tapaukselle, jossa vesi on lämpötilassa 25 °C, saadaan lauhduttimen entalpien muutokseksi 288,5 kJ/kg ja keskimääräiseksi lämpötilaeroksi 26,44 °C. Liitteessä 2 on kuvaa 5 vastaava kuvaaja, johon on piirretty kaikki kolme kiertoprosessin laskettua tapausta.

4.3.1 Kompressorin

Kompressorin tehoksi on valittu 200 W. Kompressorin teho valikoitui Coolpackin avulla tehtyjen kokeilujen avulla tasaluvuksi pyöristämällä. Suuremmalla teholla vesi lämpiäisi hyvin nopeasti ja pienemmällä jäähdytysteho olisi huomaamaton. Valittu kompressorin teho määrittää koko laitetta hyvin voimakkaasti, sillä se määrää

kiertoaineen massavirran lisäksi höyrystymis- ja lauhtumistehot sekä yhden toimintajakson pituuden. Aikaisemmin saatiin entalpioiksi h_1 589 kJ/kg ja h_2 664,8 kJ/kg. Tällöin kompressorin tuottama entalpian muutos on 75,8 kJ/kg. Yhtälöön 2 pohjautuen voidaan nyt laskea kiertoaineen massavirta.

$$P_K = q_{m,p} \cdot \Delta h_K \Rightarrow q_{m,p} = \frac{P_K}{\Delta h_K} \quad (8)$$

missä	P_K	kompressorin teho	[W]
	Δh_K	entalpian muutos kompressorissa	[kJ/kg]
	$q_{m,p}$	kiertoaineen massavirta	[kg/s]

$$q_{m,p} = \frac{0,2 \text{ kW}}{75,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,002639 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 2,64 \frac{\text{g}}{\text{s}}$$

Nyt valitaan kompressorin pyörimisnopeudeksi 3000 rpm, joka on verkkovirran taajuus eli 50 Hz. Tällöin kompressorin moottori ei tarvitse välityksiä tai kierrosnopeuden säätöä. Coolpackin avulla saadaan selville kiertoaineen ominaistilavuus pisteessä 1, joka on 0,0736 m³/kg. Näiden tietojen perusteella voidaan määrittää kompressorin iskutilavuus.

$$V_K = \frac{q_m v}{n} \quad (9)$$

missä	V_K	kompressorin iskutilavuus	[m ³]
	v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
	n	pyörimisnopeus	[1/s]

$$V_K = \frac{0,002639 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 0,0736 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}{50 \frac{1}{\text{s}}} = 3,8846 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \approx 3,9 \text{ cm}^3$$

Kompressorin iskuilavuudeksi saatiin siis noin $3,9 \text{ cm}^3$ valittujen ominaisuuksien pohjalta. Sopiva kompressorityyppi on todennäköisesti kiertomäntäkompressori, koska se on edullisuutensa tähden yleinen vastaavissa laitteissa. Koska kompressori on yksi selkeästi kalleimmista komponenteista ilmastointilaitteissa ja tällaista laitetta suunniteltaessa on erityisesti mietittävä kustannuksia, on kiertomäntäkompressori oiva vaihtoehto.

4.3.2 Paisuntaventtiili

Yksinkertaisuutensa tähden yleinen ja edullinen kapillaariputki olisi miellyttävä ratkaisu tähän suunniteltavaan laitteeseen, mutta kiertoprosessin vaihtelevuuden takia se tuskin toimisi. Todennäköisesti hyvin toimiva ratkaisu olisi paineohjattu paisuntaventtiili, joka ohjaa prosessia pitämällä höyrystimen painetta vakiona. Se avaa venttiilin, kun höyrystimen paine laskee alle määritetyn rajan. Rajana paisuntaventtiilin sulkeutumiselle ja avautumiselle käytettäisiin tässä tapauksessa höyrystimelle mitoitettua painetta 6,3 bar.

Paisuntaventtiilillä saadaan nyt pidettyä höyrystimen paine vakiona, mutta se ei varmista, että höyrystin toimisi oikein. On mahdollista, että höyrystin ei kykene höyrystämään kaikkea sinne tuotua kiertoaainetta tarpeeksi nopeasti, jolloin kompressoriin päätyy nestettä. Tämä ongelma ratkaistaan puhaltimen nopeussäädöllä, josta kerrotaan lisää luvussa 4.4.1. Puhaltimella ilman virtausnopeutta säätäen voidaan varmistaa, että kiertoaaine tulistuu höyrystimellä toivotut kaksi astetta.

4.3.3 Tehot ja tehokertoimet

Prosessin keskimääräiseksi entalpien muutokseksi lauhtuttimella saatiin $288,5 \text{ kJ/kg}$, josta kiertoaineen massavirralla kertomalla saadaan yhtälön 2 mukaisesti laskettua keskimääräinen lauhtuttimen teho $P_{L,ave}$, jolla lauhtutin toimii, kun lämpönieluna toimiva vesi astiassaan on keskimääräisessä lämpötilassa 25 °C . Kyseiseksi tehoksi saadaan $761,6 \text{ W}$. Tästä vähentämällä kompressorin teho 200 W saadaan

keskimääräinen höyrystimen teho $P_{H,ave} = 561,6 \text{ W}$, joka on teho, jolla mitoitettava laite keskimäärin jäädyttäisi.

Saadulla keskimääräisellä lauhduttimen teholla voidaan laskea, miten kauan laite toimii yhdellä kymmenen kilogramman määritellyllä vesimäärällä, kun vettä lämmitetään 30 astetta. Veden lämmittämiseen tarvittava työ saadaan yhtälöllä 10, kun vielä tiedetään, että veden ominaislämpökapasiteetti lämpötilassa 25 °C on 4,18 kJ/kgK (Incropera et al. 2006).

$$W = c_{p,v} m_v \Delta T_v \quad (10)$$

missä	W	työ veden lämmittämiseksi	[J]
	$c_{p,v}$	veden ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
	m_v	veden massa	[kg]
	ΔT_v	veden lämpötilan muutos astiassa	[K]

Laitteen toimintajakson pituus on sama kuin lauhduttimen keskimääräiseltä teholta kestää lämmittää kymmenen kilogrammaa vettä. Yhtälön 11 avulla saadaan haettu aika selville.

$$W = P_{L,ave} t \Rightarrow t = \frac{W}{P_{L,ave}} \quad (11)$$

missä	$P_{L,ave}$	lauhduttimen keskimääräinen teho	[W]
	t	aika veden lämmittämiseen	[s]

$$t = \frac{c_{p,v} m_v \Delta T_v}{P_{L,ave}} = \frac{4180 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 10 \text{ kg} \cdot 30 \text{ K}}{761,6 \text{ W}} = 1646,5 \text{ s}$$

Yhden laitteen toimintajakson pituus on tämän perusteella siis noin 27,5 minuuttia. Tämä tarkoittaa, että laite pystyy jäädyttämään yli puolen kilowatin teholla lähes puoli

tuntia. Lasketaan vielä kaikkien kolmen käsitellyn tilanteen tehokertoimet laitteen jäädytykselle eli kylmäkertoimet yhtälön 1 mukaisesti. Kylmäkertoimet eivät ole teoreettisia, koska niissä on otettu huomioon kompressorin isentrooppinen hyötysuhde. Entalpian muutos kompressorissa on vakio 75,8 kJ/kg. Entalpian muutos höyrystimellä laskee lauhdeveden lämpötilan noustessa. Entalpian muutokset ovat parhaiten nähtävissä liitteestä 2. Taulukosta 1 nähdään entalpian muutokset höyrystimellä ja niiden mukaiset kylmäkertoimet lauhdeveden lämpötilan suhteen.

Taulukko 1: Laskennalliset kylmäkertoimet kolmessa tarkastelupisteessä.

Lauhdeveden lämpötila [°C]	Entalpian muutos höyrystimellä [kJ/kg]	Kylmäkerroin
10	338,5	4,47
25	212,7	2,81
40	65,4	0,86

4.4 Lämmönsiirto

Tässä luvussa esitellään mitoitettavan vesilauhdutteen siirrettävän ilmastointilaitteen lämmönsiirron tekniikkaa. Ensin tarkastellaan ilman ja kiertoaineen välistä lämmönsiirtoa, puhaltimen osuutta lämmönsiirron ja prosessin toiminnan kannalta sekä kosteuden poistoa ilmasta. Tämän jälkeen tarkastellaan vielä lämmönsiirtoa kiertoaineesta veteen.

4.4.1 Lämmönsiirto ilmasta kiertoaineeseen

Lämmönsiirrolla ilmasta kiertoaineeseen otetaan lämpöä höyrystimelle kiertoaineen höyrystämiseksi, mikä jäädyttää ilmaa. Oletusarvoisesti tämä lämmönsiirrin on vastaava lamellipatteri kuin tarkastellussa ilmalauhdutteisessa esimerkkilaitteessa. Lasketaan aluksi miten suuri ilmamäärä yhdellä käyttäjaksolla voidaan jäädyttää. Yhtälöiden 10 ja 11 perusteella saadaan yhtälö 12, jolla ratkeaa 10 astetta jäädytettävän ilman massa. Ilma oletetaan nyt kuivaksi, jolloin sen

ominaislämpökapasiteetti on keskimääräisessä lämpötilassa 25 °C noin 1007 J/kgK (Incropera et al. 2006).

$$m_i = \frac{P_{H,ave} t}{c_{p,i} \Delta T_i} \quad (12)$$

missä	m_i	ilman massa	[kg]
	$P_{H,ave}$	höyrystimen keskimääräinen teho	[W]
	$c_{p,i}$	ilman ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kgK]
	ΔT_i	veden lämpötilan muutos astiassa	[K]

$$m_i = \frac{561,6 \text{ W} \cdot 1646,5 \text{ s}}{1007 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 10 \text{ K}} = 91,825 \text{ kg}$$

Ilmaa saadaan siis jäädytettyä noin 92 kg ja koska ilman tiheys kyseisessä lämpötilassa on noin 1,17 kg/m³ (Incropera et al. 2006) tarkoittaa tämä noin 78,5 m³ ilmaa tilavuudeltaan. Tämä tarkoittaa pinta-alaan noin 30 m² suuruisen tilan koko ilmatilavuutta. Keskimääräinen tilavuusvirta toimintajaksolla on noin 0,0477 m³/s eli hieman vajaa viisi litraa sekunnissa. Mutta kuten aikaisemmin todettiin, tilavuusvirta on aluksi suurempi ja pienenee loppua kohden.

Puhallin toimii kierrosnopeussäätimellä, joka tarkkailee kiertoaineen tulistumista höyrystimellä. Tällöin varmistutaan siitä, ettei kompressorille mene kosteaa vaan tulistunutta höyryä. Höyrystimen tulistukseksi on määritetty 2 °C, mikä antaa hieman joustavuutta puhallinsäädölle. Pääpiirteittäin puhallinsäätö toimisi niin, että se pienentää puhaltimen pyörimisnopeutta, kun tulistus ylittää kaksi astetta ja suurentaa sitä tulistuksen laskiessa alle kahden asteen. Tässä voisi toki olla pieni, esimerkiksi puolen asteen toleranssi, jolloin löytyy helpommin tasapainotila, jossa puhaltimen kierrosnopeuden ei tarvitsisi muuttua koko ajan.

Erityisesti hitaalla virtausnopeudella tähän lämmönsiirtimeen voi tiivistyä vettä ilman kosteudesta. Tiivistyvän kosteuden määrää on vaikea arvioida, koska varsinkin suuremmilla virtausnopeuksilla tiivistynyt vesi saattaa päätyä takaisin huonetilaan ilmavirran mukana. Arvioidaan kuitenkin kosteuden tiivistymistä äärimmäisessä tapauksessa, jolloin 30 °C ilman suhteellinen kosteus on 100 %. Tällöin yksi kilogramma ilmaa sisältää 27,2 grammaa vettä. Oletetaan, että suhteellinen kosteus jäädytetyllä 20 °C ilmalla on myös 100 %, jolloin kilogrammassa ilmaa on enää 14,7 grammaa vettä. Jos koko toimintajakson aikana laitteen jäädyttämästä 91,8 kilogrammasta ilmaa poistuu kosteutta kilogrammaa kohden tämä 12,5 grammaa on poistettu kosteus 1,15 kg. Kosteutta voi siis tiivistyä ilmasta merkittävä määrä. Tiivistynyt vesi johdetaan lämmönsiirtimeltä astiaan, jossa se voi osallistua kiertoaineen lauhduttamiseen. Tällöin saadaan hyödynnettyä kosteuden tiivistämiseen ja jäädyttämiseen kulunut energia, joten se voidaan jättää ottamatta huomioon laskennassa. Jäähdytettävän ilman käsittely kuivana ei siis tuota erityisen merkittävää virhettä.

4.4.2 Lämmönsiirto kiertoaineesta veteen

Lämmönsiirto kiertoaineesta veteen tapahtuu vesiastiassa, joka ennen laitteen käynnistämistä täytetään kylmällä vesijohtovedellä, jonka lämpötilaksi on arvioitu tässä työssä 10 °C. Kiertoaineen lauhduttaminen veteen lämmittää veden 40 °C lämpötilaan saakka. Lämmönsiirrin voisi olla yksinkertaisesti kuparikierukka, joka sijaitsee mahdollisimman lähellä astian pohjaa. Tämä mahdollistaa vapaan konvektion astiassa, jolloin lämmin vesi nousisi astian yläosaan. Astian voisi jopa suunnitella niin, että vapaan konvektion veteen tuottama liike olisi mahdollisimman tehokasta, mikä parantaisi lämmönsiirtymistä. Tällöin lämmönsiirtimen pinta-ala voisi olla pienempi, mikä tarkoittaa kustannussäästöjä kupariputkessa. Vielä paremman tuloksen tuottaisi mekaaninen veden kierrättäjä, jolla kuparikierukkaa jäädytettäisiin pakotetulla konvektiolla. Tämä viimeistään riittäisi takaamaan tarpeeksi tehokkaan lämmönsiirron tekemättä kierukasta epäkäytännöllisen suurikokoista.

5 MITOITUKSEN TARKASTELU

Tässä kappaleessa tarkastellaan tehdyn mitoituksen tuloksia, pohditaan lyhyesti suunnitellun laitteen käyttökohteita ja laitteen käytön mahdollisuuksia. Lisäksi mietitään laitteen järkevyyttä ja käytön tehostamista sekä vesilauhdutteen jäähdytyksen mahdollisuuksia. Edellisen luvun laskelmien perusteella mitoitettu laite lämmittää 10 kg vettä 30 astetta ja jäähdyttää 78,5 m³ ilmaa 10 astetta 27,5 minuutin mittaisen toimintajaksonsa aikana. Kun kompressorin tehoksi valittiin 200 W isentrooppihyötysuhteella 60 %, laitteen keskimääräiseksi jäähdytystehoksi saatiin 561,6 W, jolloin keskimääräinen kylmäkerroin on 2,81. Vaikka kylmäkerroin alittaakin yhden veden lämmitessä, on keskimääräinen kylmäkerroin silti hyvä, koska kylmällä vedellä se on hyvin korkea. Tosin kylmällä vedellä olisi aluksi mahdollista jäähdyttää ilmaa hetken ilman kompressoriakin, koska se on oletusten perusteella 20 astetta ilmaa kylmempää.

Mitoitettu laite kuluttaa erittäin vähän sähköä, mutta toisaalta sillä voidaan jäähdyttää vain hyvin paikallisesti. Pieni jäähdytysteho kuitenkin on riittävä, jos suora auringon valo ei lämmitä tilaa. Juuri tällaiseen kohteeseen laite onkin tarkoitettu. Konttorihuone keskellä toimistorakennusta ilman jäähdytystä on melko optimaalinen käyttökohde, mutta käyttöjakson pituus on merkittävä ongelma. Jos jäähdytyksen tarve on jatkuvaa, tulee veden laitteeseen puolen tunnin välein vaihtaminen raskaaksi ja voi jopa näkyä vesilaskussa. Vesiastian tilavuuden kasvattaminen tekisi kantamisen raskaaksi, jolloin kiinteät vesiliitokset laitteeseen poistaisivat vaivan. Suunnitellun laitteen käyttöjaksoa voisi pidentää katkomalla kompressorin käyntiä, kun vesi on kylmimmillään. Tällöin puhallin voisi käydä enemmän pienillä kierroksilla, mikä vähentäisi myös meluhaittaa. Lisäksi tuotettu jäähdytysteho olisi tasaisempi käyttöjakson aikana.

Puolesta tunnista tuntiinkin kompressorin käyttöä katkomalla venytetty toimintajakso voi olla edelleen käyttäjän kannalta liian lyhyt aikaväli veden vaihtamiselle. Laitteen käytön järkevyys on siis hyvin tila- ja käyttäjäkohtainen asia. Laitteen järkevyyttä tukee kuitenkin kosteuden poiston mahdollisuus samaan astiaan sekä lämmitetyn veden mahdollinen hyödyntäminen esimerkiksi pesuvetenä. Lämpimän käyttöveden

tuottaminen onkin yksi vesilauhdutteen jähdytyksen tärkeimpiä hyötyjä, koska tuotettu lämpö ei mene hukkaan, kuten ilmalauhdutteisessa jähdytyksessä tyypillisesti.

Vesilauhdutteinen jähdytys olisikin parhaimmillaan suurien tilojen kiinteässä tuloilman jähdytyksessä yhdistettynä lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Jossain tapauksissa olisi mahdollista jopa tehdä käyttöveden erikseen lämmittäminen täysin turhaksi. Tällä tavalla laite voisi toimia erityisesti paikoissa, joissa jähdytyksen tarve on jatkuvaa ja lämpimän veden tarve on sopiva. (Huimin et al. 2006)

Mitoituksessa käytettiin jonkin verran yksinkertaistuksia, joilla on epäilemättä vaikutusta tuloksiin. Tätä vaikutusta on kuitenkin vaikea arvioida ilman merkittävästi tarkempaa laskentaa ja prosessianalyysiä. Prosessissa ainoastaan kompressorin isentrooppihyötysuhteen huomioiminen häviönä on todennäköisesti melko vähän vaikuttava yksinkertaistus, koska muut häviöt ovat käytännössä melko pieniä. Voidaan myös ajatella, että kompressorin isentrooppihyötysuhde voisi olla käytännössä parempi, jolloin se laskuissa ottaisi huomioon muut häviöt. Oletus, että lämpö siirtyy kiertoaineen ja veden välillä lauhduttimessa samalla teholla huolimatta kiertoaineen olomuodosta on tätä vastoin melko karkea, koska on selvää, että kiertoaineen olomuoto vaikuttaa konvektiolämmönsiirtokertoimeen. Ilman oletaminen kuivaksi on myös karkea yksinkertaistus, joka perustuu kondenssiveden lämmittämiseen vesiastiassa. Prosessin hyötysuhde ja talteen otetun kondenssiveden määrä vaikuttavat tähän oletukseen. Lisäksi kuparikierukan lämmönsiirto veteen jätettiin avoimeksi olettaen, että se toimisi. Kolmen viimeisen oletuksen tarkempi tarkastelu tulisi kyseeseen yksityiskohtaisessa lämmönsiirtimien mitoituksessa.

6 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä on selvitetty höyrystymisprosessin toimintaa ja siihen pohjautuvan kompressorijäähdytyksen tekniikkaa sekä syvennytty erityisesti siirrettävien ilmastointilaitteiden tekniikkaan ja toimintaan. Ilmalauhdutteista siirrettävää ilmastointilaitetta tarkasteltiin esimerkkilaitteen avulla ja vesilauhdutteista yleisemmällä tasolla. Esiteltyjen faktojen ja huolellisesti valikoitujen määreiden pohjalta mitoitettiin siirrettävän vesilauhdutteisen ilmastointilaitteen prosessi sekä laitteiston pääosat alustavasti. Mitoitus tehtiin luvussa neljä ja luvussa viisi pohdittiin mitoituksen tuloksena saadun laitteen järkevyyttä. Mitoitetun laitteen suuri etu, mutta samalla myös merkittävin kompastuskivi on sen käsin täytettävä lämpönieluna toimiva vesiasia, joka parantaa merkittävästi siirrettävyyttä, mutta kuormittaa käyttäjää. Lopputuloksena voidaan todeta, että mitoituksen mukainen laite on toimiva, mutta vain harvassa tilanteessa paras mahdollinen ratkaisu tilan jäähdytykseen.

LÄHDELUETTELO

Aalto Esa. Yleistä kylmäaineista ja niiden rajoituksista. Suomen Kylmäliikkeiden Liitto ry [pdf-verkkotiedote liiton www-sivuilla]. Päivitetty 20.8.2008, [viitattu 24.3.2013]. Saatavissa: <http://www.skll.fi/www/att.php?id=45>

Aittomäki Antero. 1988. Jäähdytystekniikka, teoreettiset perusteet. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu. 314 s. ISBN 951-720-685-2

Huimin Jiang, Yiqiang Jiang, Yang Wang, Zuiliang Ma, Yang Yao. 2006. An experimental study on a modified air conditioner with a domestic hot water supply (ACDHWS). Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2005.07.004>

IFA. GESTIS Substance Database. Propane [artikkeli ainetietokannassa]. [viitattu 8.5.2013]. Saatavissa: [http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/010020.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis-en.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_en/010020.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)

Incropera Frank, Dewitt David, Bergman Theodore, Lavine Adrienne. 2006. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. painos. ISBN 978-0-471-45728-2

Kuluttaja- ja kilpailuvirasto. Ilmalämpöpumpun lopullinen hinta voi olla yllätys [verkkotiedote]. Päivitetty 28.4.2009, [viitattu 13.3.2013]. Saatavissa: <http://www.kuluttajavirasto.fi/fi-FI/tiedotteet-09/?groupId=08b0c10b-c228-4d97-84da-2209a2a25599&announcementId=3a8d9290-c361-4696-a6af-10c092894c2d>

KwiKool. KWIB1411 [pdf-tuoteseloste yrityksen www-sivuilla]. Päivitetty 6.7.2012, [viitattu 10.4.2013]. Saatavissa: <http://www.kwikool.com/UnitPDF/KWIB1411%20-%201.1-ton%20115-volt.pdf>

Parker Philip M. 2008. The 2009 Report on Portable Domestic Air Conditioners: World Market Segmentation by City. Business Source Complete [verkkajulkaisu], viitattu [12.3.2013]. Saatavissa:

<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=59112896&site=ehost-live>

Repo Harri. 2010. Helle kiihdyttää ilmalämpöpumppujen kauppaa. Tekniikka&talous [verkkolehti], [viitattu 12.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.tekniikkatalous.fi/energia/helle+kiihdyttaa+ilmalampopumppujen+kauppaa/a473707>

Scanoffice. Polaria - vesilauhdutteiset kompressoriyksiköt. Tuote-esite [maahantuojan www-sivuilla]. Päivitetty 26.9.2012, [viitattu 7.4.2013]. Saatavissa:

http://www.scanoffice.fi/uploads/Products/product_45/esite_polaria_mcw12-20.pdf

Seppänen Olli. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo: LVI-yhdistysten Liitto. ISBN 951-96098-0-6

Skaer Mark. 2006. The Benefits of Portable A/C. Achrnews [verkkolehti]. Päivitetty 10.7.2006, [viitattu 13.3.2013]. Saatavissa: <http://www.achrnews.com/articles/the-benefits-of-portable-a-c>

Spinea Oy. Siirrettävät ilmastointilaitteet. Tuoteluettelo [yrityksen www-sivuilla].

Päivitetty 6.4.2013, [viitattu 7.4.2013]. Saatavissa: <http://www.spinea.fi/siirrettavat.htm>

Thomson Roger. Two-Hose Units in Residential Applications. Achrnews [verkkolehti].


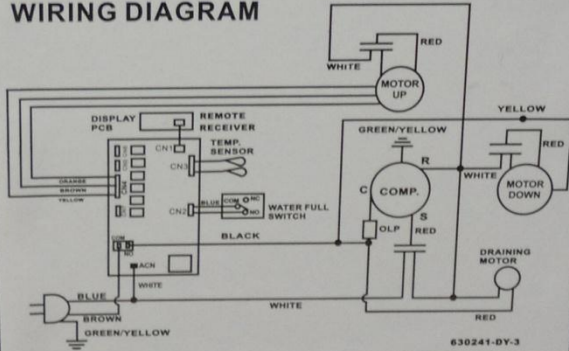
Päivitetty 9.6.2007, [viitattu 13.3.2013]. Saatavissa:

<http://www.achrnews.com/articles/two-hose-units-in-residential-applications>

Wikipedia. Air conditioning, Portable units. Päivitetty 9.4.2013, [viitattu 10.4.2013].

Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Air_conditioning

LIITE 1. DOMESTO PRO9000BTU -ILMASTOINTILAITTEEN TUNNUSKILVET JA TEKNISET TIEDOT

<p>Contains fluorinated greenhouse gases covered by the Kyoto Protocol</p> <p>Hermetically sealed Refrigerant: R410A Refrigerant total quantity: 0.49 Kg</p> <p>Refrigerant composition: HFC32: 50% HFC125: 50% Global Warming Potential:1975</p>	 Ilmastointilaitte	
	<p>Malli PRO9000BTU Käyttöjännite 220-240V~ 50Hz Teho (EN60335) Viilennys 1100W Lämmitys 950W Viilennysteho 2600W Lämmitysteho 2600W Kosteudenpoisto (30°C RH80%) 50 litraa / päivä Maksimi käyttöpainne 5.5MPa(55Kgf/cm²) Kylmäaine R410A, 490g Mitat (mm) 300Wx480Dx630H Sarjanro.: PRO9000BTU11090169</p>	<p style="text-align: right;">630366-0Y-11</p>
<p>WIRING DIAGRAM</p>  <p style="text-align: right;">630241-DY-3</p>		

Tekniset tiedot

Malli	PRO9000BTU
Jännite	220-240 V ~50 Hz
Ottoteho	Jäähdytys: 1100 W; Lämmitys: 950 W
Nimellinen teho	Jäähdytys: 2600 W; Lämmitys: 2600 W
Kosteudenpoisto	50 l / 24 h
Ilmankierto	360 m ³ / h
Peittoalue	15-30 m ²
Jäähdytysaine	R410A, 490 g
Melutaso	< 53 dBA
EU-energialuokka	A
EER	2.61
Mitat	300 (L) x 480 (S) x 630 (K) mm
Paino	25 kg
Käyttölämpötila	Jäähdytys: 17 - 32°C, lämmitys: 5 - 25°C

LIITE 2. MITOITETUN PROSESSIN KOLME TARKASTELTUA VAIHETTA LOG(p),h-PIIRROKSESSA

