

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2024

Jeri Lehtinen

Risteilylaivan ilmastoinnin jäähdytys- ja puhallinteho

Jäähdytys- ja puhallintehon arviointi hotellitiloissa
laivakoon ja olosuhdemuuttujien perusteella

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2024 | 49 sivua

Jeri Lehtinen

Risteilylaivan ilmastoinnin jäähdytys- ja puhallinteho

Jäähdytys- ja puhallintehon arviointi hotellitiloissa laivakoon ja olosuhdemuuttujien perusteella

Tämä opinnäytetyö on toteutettu Meyer Turku Oy:n toimeksiantona, tavoitteena tutkia risteilylaivan ilmastointilaitoksen jäähdytys- ja puhallintehoon vaikuttavia tekijöitä ja selvittää, miten suunnitteilla olevan laivan tehontarpeita voitaisiin arvioida hyvin varhaisessa vaiheessa projektia olevilla tiedoilla ja mitoilla.

Työ toteutettiin hyödyntäen kirjallisuutta, aiheesta tehtyjä opinnäytetöitä sekä alalla työskentelevien asiantuntijoiden haastatteluja ja keskusteluja. Lisäksi työssä vertailtiin muutamia kymmenen vuoden aikana rakennettujen risteilylaivojen arvoja keskenään yhtäläisyyksien ja kertoimien tunnistamiseksi.

Työn tuloksena saatiin suuntaa antavia kertoimia ja arvoja, joilla tarvittavaa jäähdytys- ja puhallinkapasiteettia voidaan arvioida ja tuloksia hyödyntäen toimeksiantajalle laadittiin laskin, jolla arviointia on mahdollista tehdä. Lisäksi saatiin käsitys systeemin toiminnasta ja siihen vaikuttavista määräyksistä ja eri muuttujien vaikutuksista.

Työn lopputuloksena voidaan todeta systeemin olevan hyvin riippuvainen muuttujien vaikutuksista ja tarkastelun tällä tasolla olevan hyvin suuntaa antavaa. Laivavertailua olisi saatu suuremmalla otannalla mahdollisesti laadukkaammaksi. Työn tuloksien pohjalta laadittu laskin toimii ja sen jalostaminen tämän työn pohjalta on tulevaisuudessa mahdollista.

Asiasanat: Ilmastointijärjestelmät, Risteilyalukset, Arviointi

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environment engineering

2024 | 49 pages

Jeri Lehtinen

Cooling and fan power of a cruise ship's air conditioning system

Assessment of cooling and fan power in accommodation areas based on ship size and environmental variables

This thesis was conducted as a commission by Meyer Turku Oy, with the objective of investigating the factors affecting the cooling and fan power of the air conditioning system on a cruise ship. The goal was to determine how the power requirements of a ship under design could be assessed at a very early stage of the project, using the available data and dimensions.

The study was carried out by utilizing literature, previous theses on the subject, and interviews and discussions with experts working in the field. Additionally, the values of several cruise ships built over the past decade were compared to identify similarities and coefficients.

As a result of the work, indicative coefficients and values were obtained, which can be used to estimate the required cooling and fan capacity. A calculator was also developed for the commissioning company, enabling these assessments to be made based on the results. Furthermore, an understanding of the system's operation, the regulations affecting it, and the impact of different variables was gained.

In conclusion, it can be determined that the system is highly dependent on the influence of variables, and the assessment at this level is very indicative. A larger sample size in the ship comparison might have resulted in higher quality

data. The calculator developed based on the findings of the study is functional and can be further refined in the future.

Keywords: Air conditioning systems, cruise ships, estimation

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
1.1 Työn tavoitteet	8
1.2 Työn rajaus	8
2 Yleiset vaatimukset mitoitukselle	11
2.1 EN ISO standardi 7547	12
2.2 DNV Comfort Class	13
3 Muuttujat	16
3.1 Laivasopimus ja erittely	16
3.2 Laivan bruttovetoisuus	18
3.3 Jäähdytettävät alueet	19
3.3.1 Yleiset tilat	19
3.3.2 Hyttialueet	20
3.3.3 Portaikot	21
3.3.4 Keittiö- ja huoltotilat	22
3.4 Kokonaishenkilömäärä	23
3.5 Ilmasto ja sääolosuhteet	24
4 Laivan ilmastointijärjestelmä	31
4.1 Järjestelmäkuvaus	31
4.2 Ilmanvaihtokoneet	33
4.3 Puhallinkonvektorit	37
4.4 Jäähdytys- ja puhallintehon mitoitus	40
5 Excel-laskin	44
6 Yhteenveto & pohdinta	46
Lähteet	48

Kuvat

Kuva 1. Kokonaisjäähdytysteho bruttovetoisuuteen verrattuna.	18
Kuva 2. Matkustajien ja miehistön yleiset tilat (Laiva 1)	20
Kuva 3. Matkustajien hyttialueet (Laiva 1)	21
Kuva 4. Matkustajien ja miehistön portaikot (Laiva 1)	22
Kuva 5. Laivan huoltotilat ja keittiöt (Laiva 1)	22
Kuva 6. Vertailu tilojen jakaumasta laivoissa.	23
Kuva 7. Risteilymatkustajien osuudet kartalla vuonna 2023. (CLIA 2024, 10)	26
Kuva 8. Käytetyt säädatapisteet kartalla.	27
Kuva 9. Rannikoiden korkeimmat lämpötilat viikoittain. (Visual Crossing)	28
Kuva 10. Rannikoiden korkeimmat suhteelliset kosteudet viikoittain. (Visual Crossing)	29
Kuva 11. Laivan ja sääaseman mittaamien entalpia-arvojen vertailu.	30
Kuva 12. Vesijäähdyttimen toimintaprosessi. (Tanninen 2020, 32)	32
Kuva 13. Jäähdytystehon mitoitus Mollier-piirroksesta.	42

Taulukot

Taulukko 1. Kesä- ja talvisuunnitteluolosuhteet (ISO 7547:2002)	12
Taulukko 2. Luokiteltavat alueet. (DNV Pt.6 Ch.8)	14
Taulukko 3. Aluekohtaiset parametrit eri mukavuusluokille. (DNV Pt.6 Ch.8)	15
Taulukko 4. Laivasopimuksen tärkeimmät osat (Fisher 2008, 3)	16
Taulukko 5. Suunnittelukriteerit laivoille eri ympäristöolosuhteissa.	17
Taulukko 6. Miehistön määrä matkustajaa kohden.	24
Taulukko 7. Yleisten tilojen ilmamäärien vertailu.	34
Taulukko 8. Hyttien tuloilmamäärien vertailu.	35
Taulukko 9. IV-koneiden samanaikaisuuskertoimien vertailu	37
Taulukko 10. Yleistilojen puhallinkonvektoreiden ilmamäärät.	38
Taulukko 11. Hyttityyppien ilmanvaihtokertoimien vertailu.	39
Taulukko 12. Puhallinkonvektoreiden samanaikaisuuskertoimien vertailu.	40

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Atrium-tila	Avonainen vähintään kolmen kansivälin korkuinen yhtenäinen tila
CARNOT	Maksimi teoreettinen hyötysuhde
CLIA	Cruise Lines International Association
CO ₂	Hiilidioksidi
DNV	Det Norske Veritas
Entalpia	Aineen sisältämä energia kJ/kg
ISO	The International Organization for Standardization
Laiva 1	Risteilylaiva, bruttovetoisuus 249 000 grossitonnia
Laiva 2	Risteilylaiva, bruttovetoisuus 186 000 grossitonnia
Laiva 3	Risteilylaiva, bruttovetoisuus 184 000 grossitonnia
Laiva 4	Risteilylaiva, bruttovetoisuus 113 000 grossitonnia
Laiva 5	Matkustaja-autolautta, bruttovetoisuus 57 000 grossitonnia
LTO	Lämmöntalteenotto
Pa	Pascal, paineen yksikkö SI-järjestelmässä
RH	Relative humidity, suhteellinen kosteus %
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
USPH	United States Public Health Service

1 Johdanto

1.1 Työn tavoitteet

Tämän opinnäytetyön aiheena ja tavoitteena on tutkia risteilylaivan ilmastointilaitoksen jäähdytys- ja puhallintehtoon vaikuttavia tekijöitä ja selvittää, miten suunnitteilla olevan laivan tehontarpeita voitaisiin arvioida hyvin varhaisessa vaiheessa projektia olevilla tiedoilla ja lasketuilla mitta-arvoilla. Opinnäytetyössä vertaillaan 3–5 eri laivan lukuarvoja ja tiloja toisiinsa, tavoitteena löytää suuntaa antavia kertoimia riittävän tarkan ja tehokkaan arvioinnin edistämiseksi tuleville projekteille. Lisäksi ilmastointiin vaikuttavia sääolosuhteita esitetään ja vertaillaan keskenään. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Turun telakka Meyer Turku Oy. Toimeksiantajan toivomus opinnäytetyön lopputuloksesta on luoda laskin hyödyntäen Microsoft excel-ohjelmaa, jolla ilmastointilaitoksen tehontarpeita voidaan simuloida ja arvioida olosuhdemuuttujien ja laivan koon perusteella riittävällä tarkkuudella huomioiden projektin alkuvaiheen tarkkuusasteen. Motiivina tutkimustyölle on ilmastointilaitoksen systeemin kokoluokan arviointi ja tarkempi mitoitus lyhyellä aikataululla, vapaasti valituilla operointialueilla ja laivan mitoilla ajatellen tulevaisuuden uudistuotantoa.

1.2 Työn rajaus

Opinnäytetyössä tutkitaan nykyaikaisten risteilyalusten kalustettujen alueiden jäähdytys- ja puhallinsysteemiä ja vertaillaan laivaprojektin alkuvaiheelle ominaisia pääarvoja keskenään. Laivaprojektin alussa ensimmäiset laivan suuruusluokkaa kuvaavat lukemat ovat lukuarvoja karkeasti rajattujen alueiden pinta-aloista ja tilavuuksista, matkustajakapasiteetista ja miehistön määrästä matkustajaa kohden sekä laivan kokonaispainoa kuvaavasta bruttovetoisuudesta. Kalustetuilla alueilla tarkoitetaan laivan miehistön työskentely-, majoitus- ja virkistystiloja sekä asiakkaille eli matkustajille tarkoitettuja majoitus- ja ruokailutiloja sekä yleisiä alueita. Aiherajauksen

ulkopuolelle on jätetty konesuunnitteluosastolle kuuluvat konehuoneet, jotka ovat pelkästään puhaltimilla tuuletettuja tiloja, eivätkä lukeudu ilmastointilaitoksen jäähdytyksen piiriin. Erillisissä kylmiöissä ja muissa vastaavissa tiloissa, joissa viilennys tapahtuu erillisen kylmäkoneen kautta tai jonkun muun kuin puhallinkonvektorin tai ilmanvaihtokoneen toimesta, eivät sisälly tutkimustyöhön. Lisäksi ulkokansilla olevat tilat, kuten allas- ja auringonottoalueet ovat rajattu työn ulkopuolelle.

Ilmastointilaitoksen tekninen tarkastelu on rajattu käsittelemään laivassa käytettäviä ilmanvaihtokoneita ja puhallinkonvektoreja, joilla pääasiallisesti sisätilojen ilmanlaatua, -vaihtuvuutta ja lämpökuormia kontrolloidaan. Laivan vesijäähdyttimet, joiden tuottamalla jäähdytysvedellä ilmanvaihtokoneille tulevaa ulkoilmaa jäähdytetään, on laitekohtainen tarkempi tekninen tutkimus rajattu aihealueen ulkopuolelle, johtuen jäähdyttimen toimintaperiaatteen merkityksettömyydestä laivan kokonaisjäähdytystehoon nähden. Lisäksi laivan Atrium-tilojen savunpoistoon määritetyn puhallintehon merkityksen ollessa sattumanvaraista, savunpoistoa ei ole huomioitu.

Ilmastovyöhyketarkastelussa olosuhdevertailu on toteutettu merialueittain, joka on laivoille pääasiallinen toimintaympäristö, huomioiden eniten liikennöidyt merialueet. Opinnäytetyön tarkkuusaste huomioiden tarkempaan maantieteelliseen paikkatietoon pohjautuvat mikroilmastot on rajattu tutkimustyön ulkopuolelle. Merialueilla esiintyvistä olosuhteista, työssä on otettu huomioon ilmastointilaitokselle oleellimmat parametrit, jotka ovat alueella vallitseva ilmanlämpötila, ilman suhteellinen kosteus sekä ilman entalpia-arvo. Muut laivaan vaikuttavat tekijät, kuten meriveden lämpötila ja auringonsäteilyn tuottama lämpöenergia on jätetty huomioimatta, meriveden lämpötilan vaikutuksen ollessa merkityksellisin vesijäähdyttimien toimintaan ja auringon säteilyn tuottaman lämpöenergian ollessa merkityksellinen vasta, kun laivan ulkokansien päälimateriaalit ja materiaalien pinta-alat sekä varjostukset ovat tiedossa.

Opinnäytetyössä on käytetty vertailussa pääosin neljää eri matkustajalaivaa, jotka eroavat toisistaan koon, teknisen erittelyn, henkilökapasiteetin,

toimintaympäristön ja osittain omistajayhtiön osalta. Kaikki vertailussa käytetyt matkustajalaivat ovat rakennettu kuluneen 10 vuoden aikana.

2 Yleiset vaatimukset mitoitukselle

Risteilylaivan ilmastointilaitoksen mitoituksessa tarkkoja määräyksiä ja vaatimuksia systeemin suuruusluokka ja merkityksellisyys huomioiden on suhteellisen vähän. Suuri osuus alalla olevien sääntelyorganisaatioiden määrittämistä parametreista ja linjauksista ovat suuntaa antavia rajauksia ja ohjeistuksia liittyen rakenteisiin, paloturvallisuuteen sekä matkustajien ja miehistön turvallisuuden ja terveyden ylläpitämiseen, jotka koskevat kaikkia risteilylaivaksi luokiteltuja aluksia. Asetettujen rajojen sisäpuolella pysymistä seurataan eri organisaatioiden toimesta. Yleisten vaatimusten ja viranomaisten määrittämien rajojensa lisäksi risteilyvarustamoilla on aikaisempiin laivoihin ja tottumuksiin perustuen vaatimuksia, liittyen laivan ilmastointiin, joita he haluavat noudattaa. (Asiantuntijahaastattelu 02.08.2024.)

Tannisen (2016, 31) mukaan yleisesti katsottuna säännöt, jotka suunnittelussa tulee huomioida ovat:

1. SOLAS, joka on kansainvälinen yleissopimus turvallisuudelle merellä. Sopimus erittelee vähimmäisvaatimukset laivan rakentamiselle, varusteille ja toiminnalle koskien turvallisuutta.
2. Yhdysvaltain viranomaisten (USPH) määrittämä ohjelma, joka antaa ohjeistusta kansalaisten terveyden ja turvallisuuden edistämiseksi ja ylläpitämiseksi. Risteilylaivan saapuessa Yhdysvaltain satamaan, ohjeistuksen tulee täyttyä.
3. Luokituslaitosten säännöt, riippuen laivan luokituksesta. Tyypillisimmät luokituslaitokset matkustajalaivoille ovat DNV ja Lloyd's Register. Luokituslaitosten tehtävänä on valvoa laivan suunnittelu- ja rakentamisvaiheen aikana, että heidän ja SOLAS-sopimuksen asettamia sääntöjä noudatetaan.

2.1 EN ISO standardi 7547

ISO 7547 Laivat ja meritekniikka – Asuintilojen ilmastointi ja ilmanvaihto – Suunnitteluolosuhteet ja laskentaperusteet on kansainvälisen ISO organisaation luoma ja ylläpitämä standardi merellä operoivien laivojen ilmastoinnille ja ilmanvaihdolle majoitus- ja asuintiloihin. Standardi määrittelee suunnitteluperusteet ja laskentamallit kaikkiin olosuhteisiin, pois lukien olosuhteet erittäin kylmillä ja kuumilla ilmastoalueilla. Standardin kolmanteen ja viimeisimpään painokseen 7547:2022 on sisällytetty myös muita standardeja aiemmilta vuosilta, mm. standardit ISO 8862–8864 ja ISO 9099, jotka käsittelevät kooltaan pienempien alusten ilmanvaihtoa. (ISO 7547:2022.)

ISO 7547 on yleisimmin käytetty standardi laivojen ilmavaihdon ja ilmastoinnin suunnittelussa, joka pätee jokaiseen kaupallista liikennöintiä harjoittavalle laivalle. Standardi määrittää suunnitteluolosuhteet ulko- ja sisätiloihin kesä ja talvikausille sekä henkilökapasiteetin, joihin jäähdytys- ja lämmitystarpeen laskenta perustuu. Lisäksi standardi määrittää vaatimuksen raikkaan ilman osuuksille. (Rakow 2019, 23.)

Taulukko 1. Kesä- ja talvisuunnitteluolosuhteet (ISO 7547:2002)

Desing conditions		
Summer	Outside air	+ 35 °C and 70 % humidity
	Indoor air	+ 27 °C and 50 % humidity
Winter	Outside air	- 20 °C
	Indoor air	+ 22 °C

Jäähdytystarpeen määrä on riippuvainen laivaan kohdistuvista ulkoisista ja sisäisistä lämpökuormista. Ulkoisia lämpökuormia ovat auringon tuottama lämpösäteily sekä lämmönsiirtyminen lämpötilaerosta johtuen ulko- ja sisäpintojen välillä. Sisäiset kuormat syntyvät matkustajista, sisätilojen välisestä lämmönsiirtymisestä, valaistuksesta ja lämpöä tuottavista koneista ja laitteista. Kokonaislämpökuormalaskenta on summa kaikkien edellä mainittujen tekijöiden tuloksista. (ISO 7547:2002.)

Rakow:n (2019, 23) mukaan tärkeimmät ISO 7547 vaatimat kriteerit ovat:

- Koko järjestelmän kokonaispaine sekä paine jokaisella kannella tulee olla positiivinen.
- Raikkaan ilman osuus kaikilla palveltavilla alueilla minimissään 40 % tuloilman määrästä.
- Raikkaan ilman määrä huoneessa 0,008 m³/s henkilöä kohden ja kylpyhuoneellisissa hyteissä ilman tulovirtaus 10 % suurempi, kuin poistovirtaus.
- Maksimi tuloilman lämpötilan nousu kanavistossa tulee rajata 2 °C asteeseen.
- Tilaan syötettävän ilman lämpötila ei saa olla yli 10 °C keskilämpötilaa matalampi tai 23 °C keskilämpötilaa korkeampi.
- Poistoilmavirtaus tulee sairaaloissa, pesuloissa ja keittiöissä olla erotettuna muista tiloista ja kanavoitu suoraan ulkoilmaan ilman uudelleen kierrätystä.

2.2 DNV Comfort Class

DNV Comfort Class on luokituslaitos DNV:n ylläpitämä vapaaehtoinen luokkamerkintä, joka tarjoaa menettelyjä matkustusmukavuuden parantamiseen kaikenlaisille alustyypeille. Comfort-luokka mahdollistaa varustamoille, käyttäjille ja telakalle tarkoin määritettyjen kriteerien sovellettavuuden, joka varmistaa ennustettavuutta määrittely- ja tilausvaiheessa ja antaa yhtenäisen käsityksen halutusta mukavuudesta kaikille osapuolille. Matkustusmukavuuden lisäksi luokittelu lisää turvallisuutta, parantaa henkilökunnan suorituskykyä sekä luo vakautta ja kilpailuetua markkinoille. (DNV n.d.)

Comfort-luokka käsittelee kahta osa-aluetta, COMF-V(crn) ääni ja värinä, COMF-C(crn) sisäilma, joissa kummassakin mukavuusluokka (crn) on luokkien yksi ja kolme välillä. Alukselle kirjattava mukavuusluokka määräytyy luokkamerkintään säädettyjen arvojen ja niiden todentamisen perusteella alkaen korkeimmasta tasosta yksi jatkuen heikompiin tasoihin kaksi ja kolme.

Yksittäiselle alukselle voidaan määrittää vain yksi erittelemätön mukavuusluokka lukuun ottamatta risteilyaluksia, joissa voidaan luokitella miehistön ja matkustajien mukavuusluokat erikseen. (DNV Pt.6 Ch.8.) Lisäksi edellytyksenä mukavuusluokitukselle taulukossa 2. osoitetut alueet tulee olla luokituslaitoksen kriteerien mukaiset.

Taulukko 2. Luokiteltavat alueet. (DNV Pt.6 Ch.8)

Classification of accommodation spaces	
Type A	Cabins
Type B	Hospitals and ward rooms
Type C	Wheelhouse, control rooms, office areas and public spaces intended for low physical activity such as conference rooms, libraries, card rooms, seating areas
Type D	Public spaces intended for high physical activity such as show lounges, dining areas, atriums, casinos, shopping areas, bars, dance lounges, discos, gymnasiums

Aluetyypeille on määritetty tarkat vaatimukset jokaista mukavuusluokkaa kohden, jotka jakautuvat erilaisiin mitattaviin parametreihin. Jokaisen alueen tulee pystyä muuttamaan lämpötilaansa sille määritetystä korkeimmasta lämpötilasta matalimpaan lämpötilaan kahden tunnin sisällä, lukuun ottamatta erikoisalueiden kohdalla tapauskohtaisesti arvioituja ajanjaksoja. Aluetyypeille määritetyt parametrit näkyvät taulukossa 3.

Taulukko 3. Aluekohtaiset parametrit eri mukavuusluokille. (DNV Pt.6 Ch.8)

Air properties and quality at different localities and comfort standard								
Designated space type	Comfort rating number	Minimum air temperature control span		Maximum air velocity	Minimum fresh air supply quantity per person		Vertical air temperature difference	Relative humidity -RH
		15 °C and below (outside)	40 °C and above (outside)		[litres/s]	[m ³ /hour]		
	crn	Min./Max. limit [°C]	Min./Max. limit [°C]	[m/s]			[°C]	[%]
A	1	18 to 24	22 to 28	0.25	10	36.0	2.0	30 to 60
	2	19.5 to 24	23.5 to 28	0.35	9	32.4	2.5	20 to 60
	3	21 to 24	25 to 28	0.40	8	28.8	3.0	< 65
B	1	18 to 24	22 to 28	0.15	12	43.2	2.0	30 to 60
	2	19.5 to 24	23.5 to 28	0.25	10	36.0	2.5	20 to 60
	3	21 to 24	25 to 28	0.35	8	28.8	3.0	< 65
C	1	20 to 24	23 to 28	0.20	10	36.0	2.0	30 to 60
	2	21 to 24	24 to 28	0.25	9	32.4	3.0	20 to 60
	3	22 to 24	25 to 28	0.35	8	28.8	3.5	< 65
D	1	20 to 24	23 to 28	0.25	10	36.0	2.0	30 to 60
	2	21 to 24	24 to 28	0.30	9	32.4	3.0	20 to 60
	3	22 to 24	25 to 28	0.40	8	28.8	3.5	< 65

1) For outside temperatures between 15°C and 40°C, the control span is to comply with the graphs shown in figures 1 and 2.
2) Unless otherwise specified by owner and yard the number of persons in each designated space will be counted according to ISO7547.
3) Any relative humidity is to be within the range for all outdoor conditions the HVAC system is designed for. It is not necessary to meet the whole range during the specified design condition.
4) Vertical air temperature difference is normally tested for the low temperature condition only.

Parametrinen erittely lisäksi mukavuusluokat edellyttävät aluekohtaista yksilöityä ja automatisoitua lämpötilan säätöä matkustajille käytössä olevilta alueilta. Vastaisuudessaan miehistöalueille vähimmäismukavuusluokkavaatimus on kolme, ellei toisin ole määritetty. (DNV Pt.6 Ch.8.)

3 Muuttujat

3.1 Laivasopimus ja erittely

Jokaisesta rakennettavasta laivasta laaditaan laivasopimus, jossa määritetään kahden sopimusta toteuttavien osapuolten, laivan omistajan ja rakentajan oikeudet ja velvollisuudet. Jokaisen laivarakennusprojektiin osallistuvan organisaation tulee työskennellä sopimuksen määrittämien ehtojen mukaan. Mikäli sopimuksessa määritettyjä oikeuksia ja velvoitteita ei määritetä riittävällä tarkkuudella, projektiin osallistuvien yritysten ja henkilöiden voi olla haastavaa antaa vaadittua työpanostaan projektille. (Fisher 2008. 1.)

Laivasopimus liitteineen koostuu sopimuksen muodostamisesta, laivaerittelyn ja keskeisten teknisten systeemien ja komponenttien määrittelystä ja sopimuksen hallinnollisista asioista rakennusvaiheen aikana ja laivan luovutuksen jälkeen. Tyypillinen runko laivasopimukselle on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Laivasopimuksen tärkeimmät osat (Fisher 2008, 3)

- Sopimus
- Sopimushdot ja olosuhteet
- Laivaerittely
- Rakennussuunnitelmat
- Kansainväliset määräykset
- Sisäiset määräykset
- Luokituslaitoksen säännöt
- Viitattut standardit

Risteilylaivan ilmaston kannalta tärkeimmät osuudet laivasopimuksesta ovat laivaerittely, olosuhteet, sisäiset- ja kansainväliset määräykset sekä

luokituslaitoksen säännöt. Laivassa olevien erilaisten jäähdytettävien tilojen takia myös erittelyssä jokainen tilatyyppe on eritelty erikseen.

Ilmastointi ja ilmanvaihtojärjestelmät – Ilmastointi majoitustiloissa – Ilmastointi yleisissä tiloissa esimerkki erittelystä:

- Tilat ja huoneet, jotka kuuluvat yleisiin tiloihin
- Ilmanvaihtokoneiden, puhallinkonvektoreiden ja erillispuhaltimien käytön jaoittelu
- Sisäilman lämpötilan ja CO₂-pitoisuuden säätö ja hallinta
- Lämpötila- ja CO₂-antureiden sijainti, määrä ja seuranta
- Menetelmät sisäilman lämmittämiseksi
- Paine-erot tilojen välillä, esim. ruokasalissa korkeampi ilmanpaine keittiöön nähden
- Ilmanvaihtokertoimet ja mitoitusolosuhteet huoneille, jotka ovat toiminnaltaan poikkeuksellisia esim. tupakointihuoneet

Olosuhteet, joihin laivan ilmastointisysteemi mitoitetaan, ovat määritetty erittelyssä suunnittelukriteereissä. Ympäristöolosuhteet määräytyvät sen mukaan, millaisissa olosuhteissa laivan omistaja haluaa laivan operoivan.

Tyypillisesti ilmoitetut olosuhteet ovat ulko- ja sisälämpötilat kesällä ja talvella, ulko- ja sisäilman suhteellinen kosteus kesällä sekä meriveden lämpötila kesä- ja talviolosuhteissa. Eri laivojen suunnittelukriteerejä on vertailtu taulukossa 5.

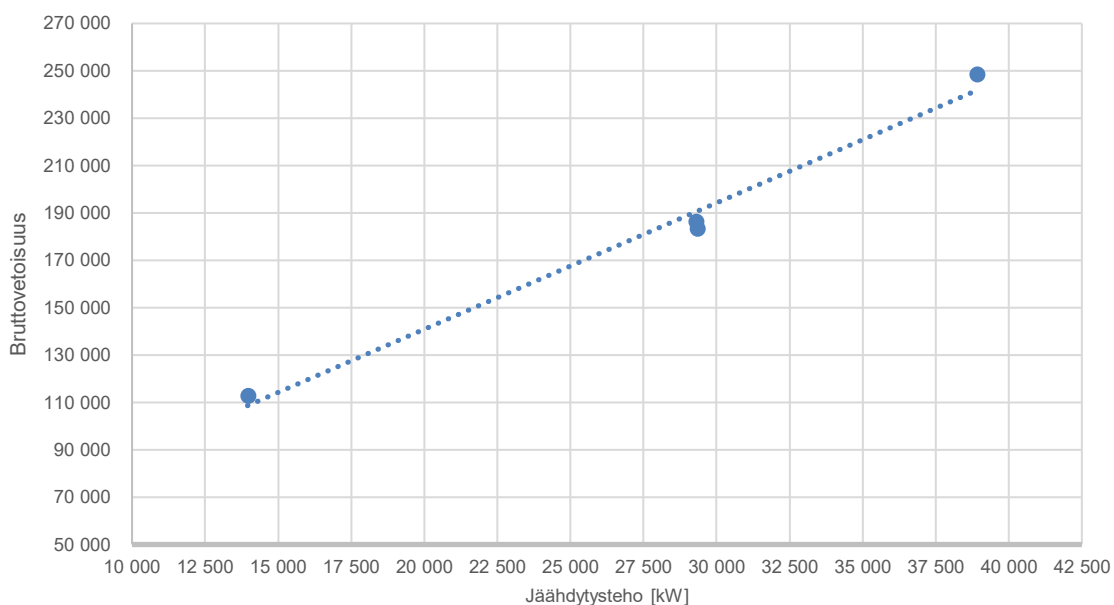
Taulukko 5. Suunnittelukriteerit laivoille eri ympäristöolosuhteissa.

	Kesä		Talvi		Merivesi	
	Ulkona	Sisällä	Ulkona	Sisällä	Kesä	Talvi
Laiva 1	+32°C, 90% RH	+22°C, 50-60% RH	0°C	+23°C	+32°C (max. +35°C)	0°C
Laiva 2	+35°C, 80% RH	+24°C, 55% RH	-10°C	+22°C, 30-50% RH	+32°C (max. +34°C)	0°C
Laiva 3	+35°C, 80% RH	+24°C, 55% RH	-10°C	+22°C, 30-50% RH	+32°C (max. +35°C)	0°C
Laiva 4	+32°C, 85% RH	+26°C, 55% RH	-7°C	+22°C	+32°C	0°C
Laiva 5	+28°C, 75% RH	+22°C, 55% RH	-25°C	+22°C, 35% RH	+25°C	0°C

Eri laivoille annetuista suunnittelukriteereistä merkittävimmät erot ovat kesäajan ulkolämpötiloissa sekä talviajan ulkolämpötiloissa, jotka määrittyvät suurilta osin laivan omistajan toiveisiin laivan operointialueesta.

3.2 Laivan bruttovetoisuus

Tunnetuin laivan kokoluokkaa kuvaava arvo on laivan bruttovetoisuus, joka mittaa laivan kokonaisvaltaista kokoa sisätilat mukaan lukien. Bruttovetoisuus lasketaan laivan kokonaistilavuuden ja korjauskertoimen tulona ja sitä käytetään mm. määräysten, turvallisuusäntöjen, rekisteröintimaksujen ja satamamaksujen määrittämiseen. Lisäksi laivojen kokoeroja toisiinsa voidaan verrata bruttovetoisuutta käyttäen. Bruttovetoisuuden ollessa vertailukelpoinen lukuarvo eri laivojen kokoluokan välillä, alapuolella kuvassa 1 näkyy vertailu eri laivojen vetoisuuksista ja jäähdytystehoista. Kuviosta huomataan osan laivoista olevan tehokapasiteetiltaan trendiviivan yläpuolella ja osan alapuolella. Tuloksista voidaan päätellä näiden kahden muuttujan välillä olevan korrelaatiota, vaikka pisteet eivät sijaitse täysin trendiviivan päällä.



Kuva 1. Kokonaisjäähdytysteho bruttovetoisuuteen verrattuna.

Kuvan 1 vertailusta poiketen, Rakowin (2019, 54) tutkimuksessa LVI-systeemin arvioinnista suurille ja keskikokoisille laivoille, tutkimuksessa tehdyn bruttovetoisuuden ja bruttotilavuuden vertailun perusteella todetaan suhteen niiden kahden arvon välillä olevan epäselvä ja käyttökelvoton. Rakowin tekemässä tutkimuksessa otanta on suurempi ja pisteet ovat jakutuneet epätasaisemmin trendiviivan ympärille.

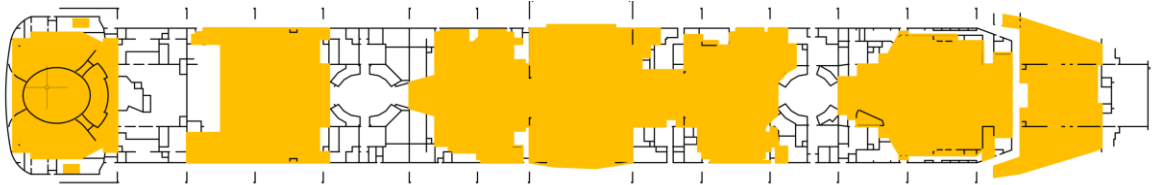
3.3 Jäähdytettävät alueet

Laivaprojektin alkuvaiheessa tehdään alustavia ilmamäärälaskelmia, jotta laivaan saataisiin alustava ilmanvaihtoluonnos runkoon tehtävien kuilujen tilantarvetta varten. Ilmanvaihtosysteemin näkökulmasta laivan sisätilat jaetaan kahteen osaan, konehuoneisiin sekä matkustajille ja miehistölle tarkoitettuihin sisätiloihin. Konehuoneet ovat pelkästään tuuletettuja tiloja, joissa sisäilman laatua ylläpidetään riittävällä tasolla tulo- ja poistopuhaltimien avulla. Sisätiloissa, joissa laivan miehistö ja matkustajat ovat, sisäilman laatua ja lämpötilaa ylläpidetään ilmanvaihtokoneiden, puhallinkonvektoreiden ja erillispuhaltimien avulla. Risteilylaivassa tyypillisesti konehuoneiden osuus laivan kokonaispinta-alasta on merkittävästi kalustettuja sisätiloja pienempi, jolloin suuri osuus laivan sisätiloista on ilmastoituja. Lopullinen määritelmä huonekohtaisista vaatimuksista eritellään laivan teknisessä erittelyssä mutta peruseriaate ja yleiskuva jäähdytyssesteemistä sekä tilatyypeistä on hyvin samankaltainen risteilylaivan koosta ja sisätiloista riippumatta.

3.3.1 Yleiset tilat

Laivan yleiset tilat jakautuvat yleisjärjestelypiirroksen perusteella miehistölle ja matkustajille tarkoitettuihin tiloihin. Matkustajille tarkoitettut yleisilat ovat erilaiset ravintolat, viihdetilat, aulat ja myymälät. Miehistön yleisiin tiloihin katsotaan lukeutuvan ruokailutilat eli messit, miehistökäytävät ja erityyppiset virkistystilat. Yleisten tilojen ollessa suuri joukko hyvin erilaisia isoja tiloja ympäri laivaa, niiden sisäilman käsittelyyn liittyy paljon vaihtelua ja muuttujia, jotka tulee ottaa

huomioon. Saman tyyppisissäkin tiloissa esiintyy huomattavia eroja riippuen tilan sijainnista ja etäisyydestä ympärillä oleviin toisen tyyppisiin tiloihin. (Vuorela 2000, 49–50.) Alapuolella kuvassa 2 näkyy poikkileikkaus yleisjärjestelypiirroksesta, jossa keltaisella olevat alueet ovat yleistiloja.



Kuva 2. Matkustajien ja miehistön yleiset tilat (Laiva 1)

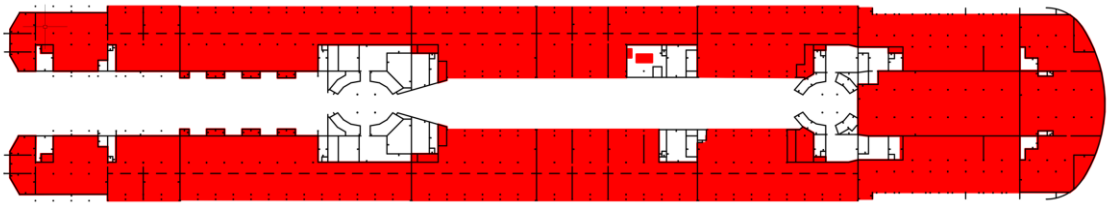
Johtuen vaihtelun tuomasta haasteellisuudesta yleisten tilojen jäähdytys- ja raitisilmamäärän tarvetta voidaan varhaisessa vaiheessa mitoittaa yleisjärjestelypiirroksista mitattavan lattiapinta-alan, matkustajamäärän, ilmanvaihtokertoimien ja sisä- ja ulkoilman entalpiaeron avulla. Kasinot, sairaalat ja tupakointihuoneet ovat tiloja, joihin on erikseen teknisessä erittelyssä määritetty ilmavaihtokertoimet eli kerroin, kuinka monta kertaa ilman tulee vaihtua huoneen tilavuuden verran, tyypillisesti yhden tunnin aikana. Ilmanvaihtokertoimen suuruus määrittyy tilan käyttötarkoituksen mukaan. Yleiset tilat, joille ei ole määritetty ilmanvaihtokertoimia ja ovat haasteellisia tilavuuslaskennan kannalta johtuen vaihtelevista kattokorkeuksista, mitoitetään matkustajapinta-alan ja matkustajaa kohden määritetyn ilmamäärän tulona.

3.3.2 Hyttialueet

Hyttialueet jaetaan matkustajien ja miehistön hytteihin. Suurin osa miehistön hyteistä sijaitsee laivan alimmilla kansilla ja ovat sijoitettu tiivisti niille varatulle sisustuspinta-alalle. Matkustajien hytit ovat sijoitettuna tilavampien hyttikäytävien varrelle ylemmille kansille ja hytit pyritään sijoittamaan laivan ulkopinnoille. Lisäksi matkustajille tarjolla olevat sviitit sekä kapteenin ja päällystön majoitustilat ovat usein hyttikooltaan isompia ja avarampia mutta niiden lukumäärä on usein hyvin maltillinen ja riippuvainen laivan koosta ja

asiakaskannasta. Hyttien lisäksi laivan hyttialueiden ilmastointiin kuuluu hyttikäytävät, varastot ja pienet aputilat. (Vuorela 2000, 47.)

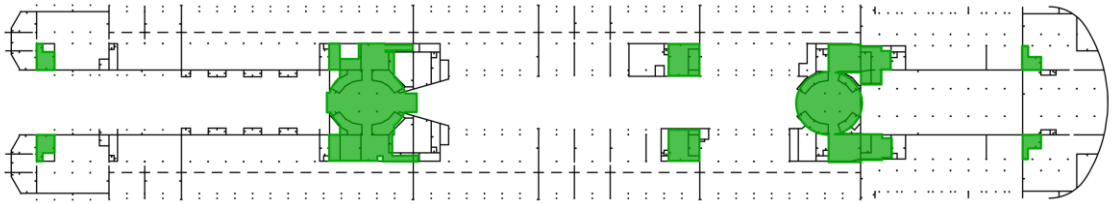
Yhdessä hyttialueet kattavat pinta-alaltaan suurimman osan laivan sisätilojen ilmastoinnista. Hyttialueiden ilmamäärän ja jäähdytystehon mitoitus perustuu tilavuuden, ilmanvaihtokertomien ja säännöissä vaadittujen ilmamäärien yhtälöön. Alapuolella kuvassa 3 näkyy poikkileikkaus yleisjärjestelypiirroksesta, jossa punaiset alueet ovat matkustajien hyttialueita.



Kuva 3. Matkustajien hyttialueet (Laiva 1)

3.3.3 Portaikot

Portaikot jaetaan matkustajien ja miehistön käytössä oleviin portaikoihin, jotka sijaitsevat yleensä hyttikäytävien läheisyydessä. Portaikkojen aulat sekä mahdollisesti välittömässä läheisyydessä olevat yleiset saniteetitilat voivat lukeutua saman ilmastointisysteemin alle mutta paloturvallisuussyistä portaikkotilat ovat omana erikseen ilmastoituna alueena. Portaikkojen jäähdytystarvetta voidaan mitoittaa tilavuuden mukaan vastaavalla tavalla hyttikäytävien kanssa, sillä usein portaikkojen korkeus yksittäisellä kannella on vastaava, kuin portaikkoon tulevien hyttikäytävien. (Henkilökohtainen tiedonanto 15.08.2024.) Alapuolella kuvassa 4 näkyy poikkileikkaus yleisjärjestelypiirroksesta, jossa vihreät alueet ovat matkustajien ja miehistön portaikkoja.

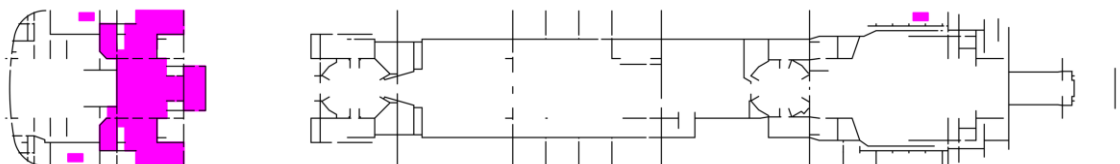


Kuva 4. Matkustajien ja miehistön portaikot (Laiva 1)

3.3.4 Keittiö- ja huoltotilat

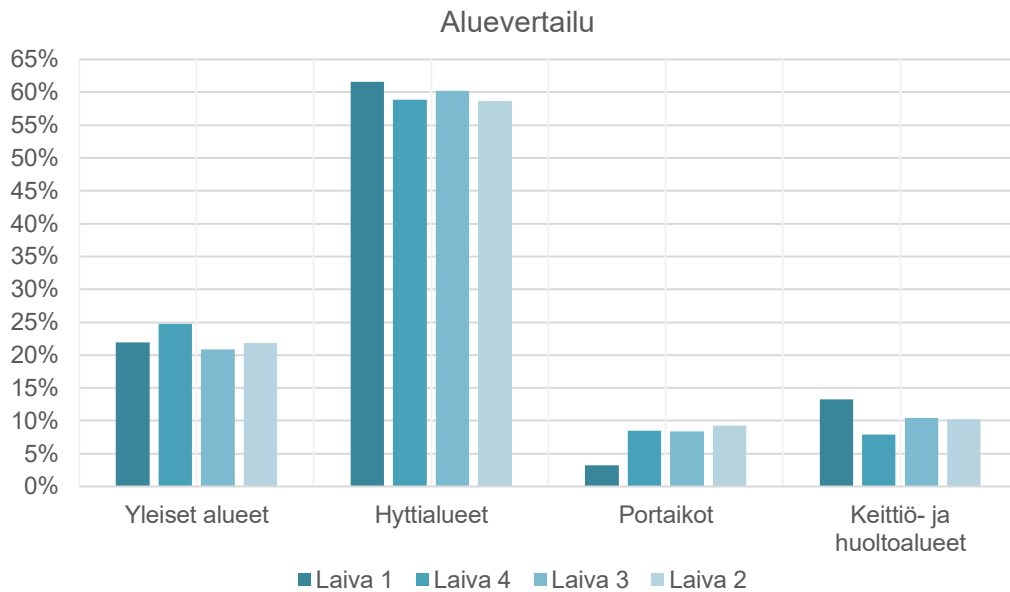
Laivan huoltotilat ja keittiöt jaetaan pesuloihin, varastoihin, kuuma- ja kylmäkeittiöihin sekä penttereihin. Pesula ja varastotiloissa pestään, silitetään ja säilötään erilaisia tekstiilejä, petivaatteita, pyyhkeitä ja muita tarvikkeita. Tilat sijaitsevat usein laivan alimmilla kansilla. Jäähdytystarpeet mitoitetaan tilavuuden ja ilmanvaihtokertoimien tulona, jotka ovat pesulatiloihin suuruusluokaltaan muutamia kymmeniä ja varastotiloissa alle kymmenen. Kuuma- ja kylmäkeittiöt sekä pentterit ovat hyvin vastaavanlaisia kuin mitkä tahansa maapuolen suurtalouskeittiön tilat, joissa valmistetaan, käsitellään, viimeistellään ja tiskataan ruoka-annoksia ja ruokailuvälineitä. Keittiötilojen lämpökuormat ja ilmanvaihdon tarve ovat usein erittäin korkeat johtuen käytettävistä laitteista ja laitetiheydestä pinta-alaa kohden. (Vuorela 2000, 52–54.)

Keittiötilojen alkuvaiheen mitoitus voidaan tehdä ilmanvaihtokertoimien ja huonetilavuuden perusteella, mutta myös pinta-alan ja ilmanvaihtokertoimien suhteena. Alapuolella kuvassa 5 näkyy poikkileikkaus yleisjärjestelypiirroksista, jossa violetit alueet ovat huolto- ja keittiötiloja.



Kuva 5. Laivan huoltotilat ja keittiöt (Laiva 1)

Laivassa olevien tilojen jakaumaa vertailtiin eri laivojen välillä, tavoitteena selvittää tilojen kokoluokan toistuvuus eri laivaprojektien välillä. Kuvassa 6 jokaisen eri alueen pinta-ala on jaettu laivan hotellitilojen kokonaispinta-alalla, jolloin saadaan alueen prosentiosuudet jokaiselle alueelle. Kaavio on näkyvässä alapuolella.



Kuva 6. Vertailu tilojen jakaumasta laivoissa.

Kaaviosta havaitaan alueiden jakauman olevan hyvin saman tyyppinen, vaikka vertailussa käytettävien laivojen todelliset koot eroavat toisistaan.

Aluejakauman toistuvuus ei kerro laivalle tarvittavaa jäähdytyskapasiteettia mutta se antaa varhaisessa vaiheessa projektia käsityksen laivassa olevien alueiden suuruusluokista, riippumatta koko laivan kokoluokasta.

3.4 Kokonaishenkilömäärä

Laivan kokonaishenkilömäärällä tarkoitetaan laivan päällä työskentelevän miehistön ja matkustajien yhteenlaskettua kokonaiskapasiteettia.

Kokonaiskapasiteettierot risteilylaivojen välillä ovat toisinaan hyvinkin suuria riippuen laivan fyysisestä koosta, asiakaskohderyhmästä, varustamosta, laivan

teemasta ja halutusta palvelun ja luksuksen määrästä ja tyylistä. Selkeä laivan ylellisyyttä ja luksusta kuvaava mittari on miehistön jäsenten määrä suhteessa matkustajien määrään eli kuinka monta miehistön jäsentä on yhtä matkustajaa kohden. Tyypillisesti isoilla risteilylaivoilla, joissa matkustajien määrä pyritään kasvattamaan mahdollisimman suureksi, miehistön henkilömäärä matkustajaa kohden jää hyvin alhaiseksi. Varustamot, jotka haluavat tarjota asiakkailleen luksusta ja enemmän kohdennettuja palveluja, miehistön kapasiteettia halutaan kasvattaa, mikä vastaisuudessaan vaikuttaa matkustajien määrään. Lisäksi erilaiset elämysmatkat, kuten risteilyt jäätikköalueille ovat tyypillisesti asiakasmääriltään hyvin rajoitettuja. Alapuolella taulukossa 6 näkyy vertailuarvoja laivojen miehistön määrästä suhteessa matkustajien määrään.

Taulukko 6. Miehistön määrä matkustajaa kohden.

	Laiva 1	Laiva 2	Laiva 3	Laiva 4
Matkustajat	7 600	6 730	6 631	3 132
Miehistö	2 350	1 646	1 745	1 092
Suhdeluku	0,31	0,24	0,26	0,35

Luvun 4.3 taulukossa 11 laskettuihin keskiarvoihin eri hyttityyppien tilavuuksista ja ilmanvaihtokertoimista, verrattuna tavalliseen matkustajahyttiin, miehistöhytit ovat noin 55 prosenttia tilavuudeltaan pienempiä ja sijaitsevat usein alimmilla kansilla, joissa jäähdytystarvetta kuormittavat tekijät ovat pienempiä. Hytin tilavuuden lisäksi ilmamäärät matkustajahyhteissä ovat huomattavasti pienempiä. Miehistön ja matkustajien suhdeluvun lähestyessä lukua yksi, tarvittavaa jäähdytystehoa on todennäköisesti vähemmän.

3.5 Ilmasto ja sääolosuhteet

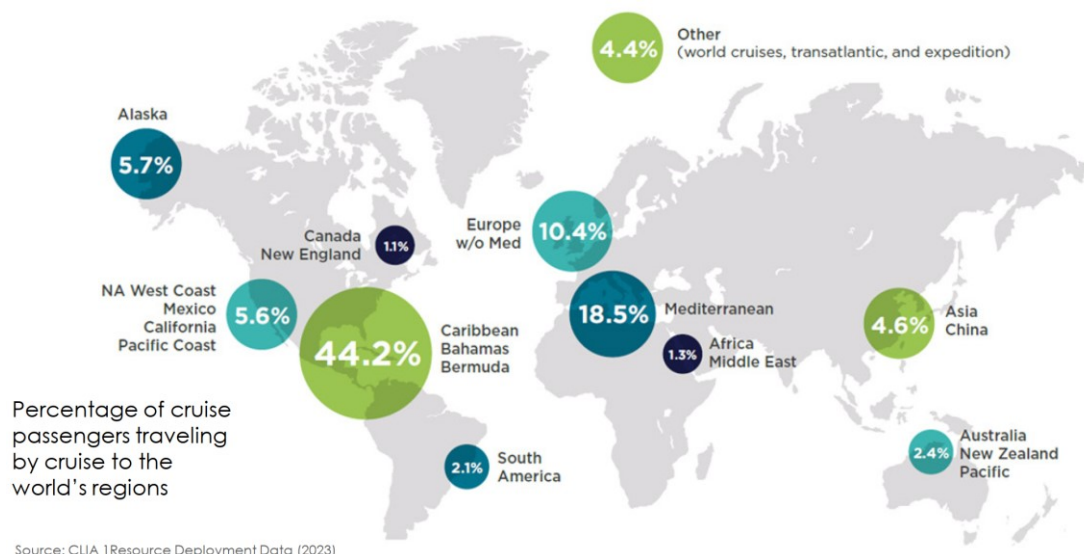
Risteilyaluksen jäähdytystarpeen määrä on riippuvainen maantieteellisestä alueesta, jonne alus on suunniteltu liikennöitäväksi. Aluksen jäähdytykseen vaikuttavia tekijöitä ovat alueella vallitseva ilman lämpötila ja ilman kosteus. Meriveden lämpötila ja auringon tuottama lämpösäteily aiheuttavat

lämmönjohtumista rakenteiden välillä, joka liikennöidessä lämpimillä ja kuumilla ilmastovyöhykkeillä kasvattaa alukseen kohdistuvaa lämpökuormaa ja kylmillä vyöhykkeillä laskee kuormitusta, korostaen lämmityksen merkitystä.

Merkittävänä erona mantereella olevien rakennusten ilmastointilaitoksen mitoittamiseen on paikkatieto, joka suunnitteilla olevalla ja operoivalla laivalla ei ole sidonnainen yksittäiseen sijaintiin, vaan vaihtelua voi tapahtua lyhyelläkin aikavälillä. Yleisesti koko ilmastointilaitoksen mitoituksen perustuessa ilman lämpötilaeroihin ja ilman ominaisuuksiin eri lämpötiloilla, tulee ilmastovyöhykkeillä esiintyvät olosuhteet ottaa suunnittelussa huomioon.

Maapallolla esiintyvät ilmastovyöhykkeet luokitellaan neljään eri luokkaan perustuen alueella esiintyvän sateen määrään ja vallitsevaan lämpötilaan. Neljä eri luokkaa ovat 1. Arktisen alueen ilmasto 2. Lauhkea mannerilmasto 3. Kuiva ilmasto 4. Trooppinen ilmasto. Pääasiallisia vaikuttajia alueella vallitsevaan ilmastoon ovat leveyspiiri, sijainti suhteessa mantereisiin ja valtameriin, sijainti suhteessa laajamittaisen ilmakehän kiertokulkuun, korkeus ja paikalliset maantieteelliset ominaisuudet. (Met Office.)

Matkustajalaivoihin vaikuttavien ilmastovyöhykkeiden tarkasteluun voidaan hyödyntää kansainvälisen risteily-yhtiöjärjestö CLIA:n tekemää vuosiraporttia alan toimintaan liittyen. Vuoden 2024 vuosiraportissa on julkaistu risteilymatkustajien prosenttiosuudet alueittain vuodelta 2023. Ylivoimaisesti suurin osuus, lähes puolet kaikista risteilyistä tapahtuu trooppisella ilmastovyöhykkeellä Karibian meren ja Bahaman alueella. Seuraavaksi suurimmat kävijämäärät ovat Välimeren ja Euroopan alueella, jotka ovat osittain kuivaa ja osittain lauhkeaa mannerilmastoa. Alaska, Amerikan länsirannikko, Kiina ja Aasia sekä jäämerialueet jakavat keskenään noin viidenneksen kaikista risteilyistä ja ovat osuuksiltaan hyvin saman suuruisia. Pienimmät kävijämäärät ovat Australian, Afrikan, Etelä-Amerikan ja Canadian alueilla. CLIA:n julkaisema karttakuva näkyy alapuolella kuvassa 7.



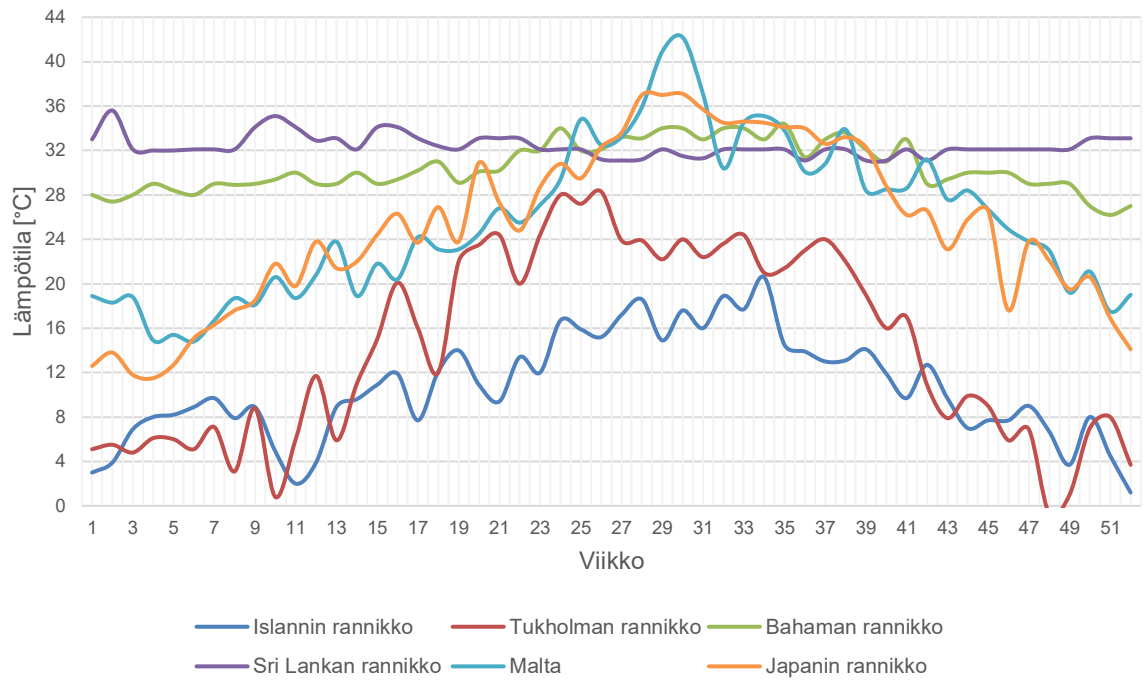
Kuva 7. Risteilymatkustajien osuudet kartalla vuonna 2023. (CLIA 2024, 10)

Pohjautuen yllä olevaan selvitykseen risteilytoiminnan jakaumasta maapallolla, vuoden aikana esiintyvistä olosuhteista olevaa dataa koottiin keskeisimmiltä alueilta risteilytoimintaan nähden. Merialueilla käytössä olevia sääasemia, joiden mittaamaa ja keräämää säädataa olisi mahdollista hyödyntää on todella vähän. Uudemmissa matkustajalaivoissa datankeruuohjelmia on otettu käyttöön, jolla voidaan kerätä ja tallentaa dataa esimerkiksi vallitsevista sääolosuhteista merialueilla. Ohjelmien käyttö on vielä hyvin vähäistä, eikä niiden tallentamaa dataa voida käyttää näin laajassa mittakaavassa. Suoraan mereltä saatavan datan sijaan, pyrittiin mantereelta löytämään keskeisimpien merialueiden rannikoilta mittauspisteitä, jotka vastaisivat mahdollisimman hyvin merialueella esiintyviä olosuhteita ja olisivat käyttökelpoisia. Työssä käytettyjen mittauspisteiden sijainnit ovat esitetty kartalla kuvassa 8.



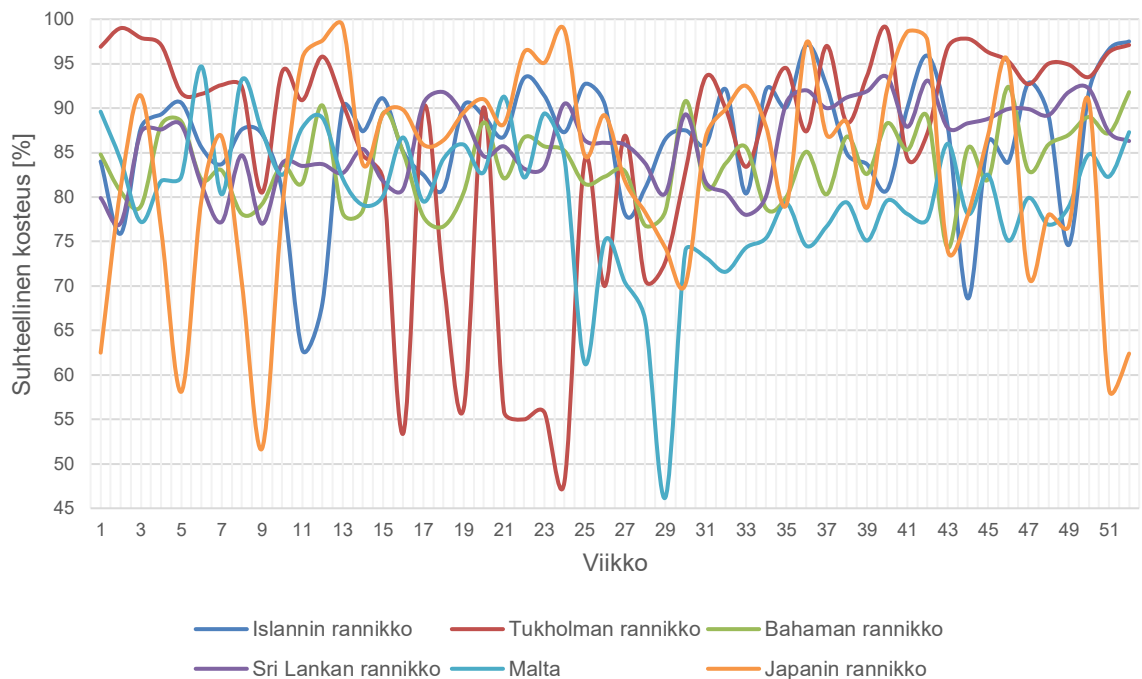
Kuva 8. Käytetyt säädatapisteet kartalla.

Valitut mittauspisteet kartalla ja niitä vastaavat merialueet ovat Islannin rannikko, joka vastaa jäämeren ja arktisen alueen ilmastoaa. Tukholman rannikko, joka vastaa Itämeren ilmastoaa. Malta, joka vastaa Välimeren ilmastoaa. Sri Lankan rannikko, joka vastaa Intian valtameren ilmastoaa. Japanin rannikko, joka vastaa Pohjoisen Tyynen valtameren ilmastoaa. Bahaman rannikko, joka vastaa Karibian meren ilmastoaa. Jokaiselta mittauspisteeltä kerätty data on vuoden 2023 ajalta vuoden jokaiselta päivältä.



Kuva 9. Rannikoiden korkeimmat lämpötilat viikoittain. (Visual Crossing)

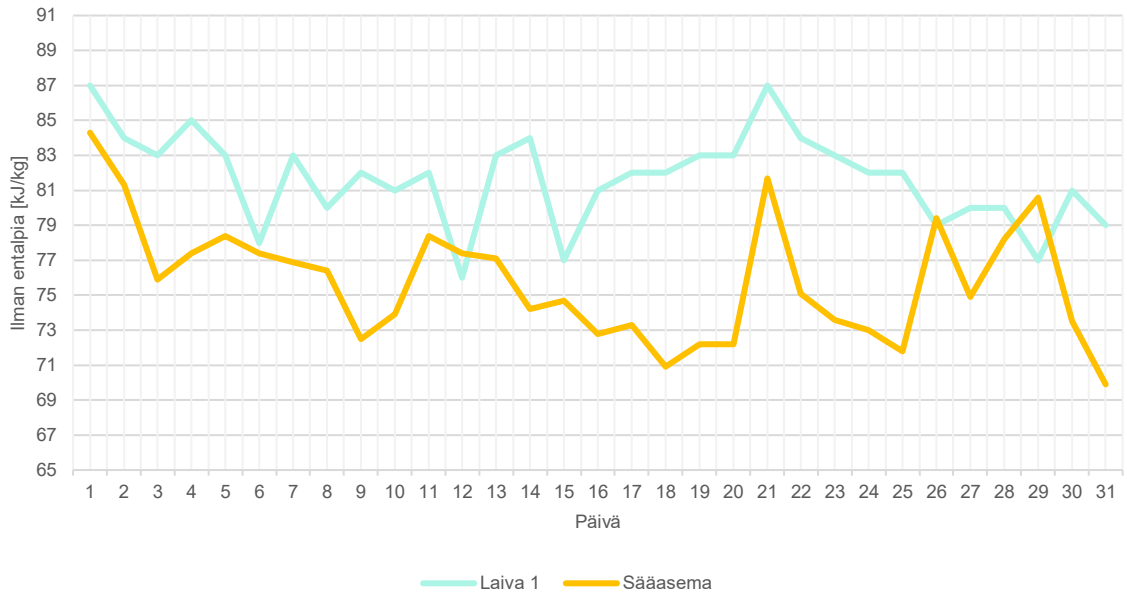
Yläpuolella kuvassa 9 on esitetty vuoden ajalta korkeimmat lämpötilat viikoittain. Kuvassa käytetty lämpötila on viikolla esiintynyt korkein lämpötila. Alapuolella kuvassa 10 on esitetty vuoden ajalta korkeimmat suhteelliset kosteudet viikoittain.



Kuva 10. Rannikoiden korkeimmat suhteelliset kosteudet viikoittain. (Visual Crossing)

Yllä esitetyistä kuvista huomataan kummassakin suurissa eroavaisuuksissa rannikkoalueiden välillä. Lämpötilassa havaitaan tiettyjen alueiden noudattavan tietynlaista profiilia ympäri vuoden. Bahaman rannikko ja Sri Lankan rannikko, jotka sijaitsevat päiväntasaajan lähetyvillä ovat lämpötilavaihtelultaan huomattavasti tasaisempia verrattuna päiväntasaajan pohjoisnavan puolella oleviin rannikkoalueisiin. Myös ilman lämpötilat ovat keskimäärin korkeampia päiväntasaajan alueilla. Rannikoilla ilman suhteellisen kosteuden vaihtelu on lämpötilavaihteluun verrattuna täysin erilainen, vaihteluvälin ollessa huomattavasti tiheämpi. Kuviosta huomataan vaihtelun olevan paljon vähäisempää päiväntasaajan tuntumassa ja arvojen olevan keskimäärin korkeammalla. Pohjoisnavan puolella vaihtelu on tiheämpää ja suurempaa, joka johtuu osittain vuoden aikana tapahtuvasta suuremmasta lämpötilan vaihtelusta. Vuoden puolivälin jälkeen lämpötilojen ollessa korkeimmillaan, suhteellisen kosteuden vaihtelu tasaantuu ja kasvaa lämpötilojen laskiessa vuoden loppua kohden huomattavasti rauhallisemmin alkuvuoteen verrattuna. Ilman entalpia eli lämpösisältö kasvaa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden

noustessa, jolloin todetaan ilmastoinnin kannalta haastavimpien olosuhteiden olevan ympäri vuoden lähellä päiväntasaajaa ja sen alapuolella, painottuen kesäajan lämpimimmille ajanjaksoille.



Kuva 11. Laivan ja sääaseman mittaamien entalpia-arvojen vertailu.

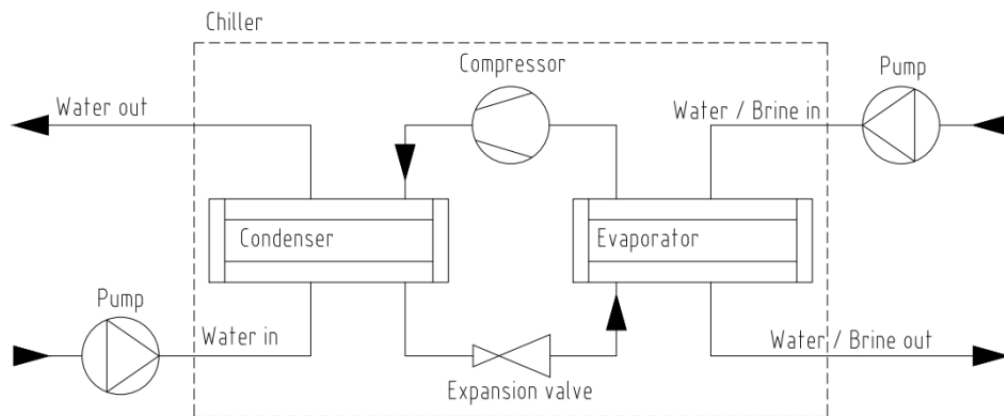
Viitaten aiemmin mainittuun olosuhteiden mittaukseen ja datankeruuseen laivalla rannikolla olevan sääaseman ja laivan mittaamia ilman entalpia-arvoja haluttiin mahdollisuuksien rajoissa verrata keskenään virhemarginaalin selvittämiseksi. Yläpuolella kuvassa 11 näkyy sääaseman ja laivan päältä vuoden 2024 heinäkuun aikana mitatut entalpia-arvot. Sääasema sijaitsee Bahaman rannikolla ja laivan operoima reitti tällä aikavälillä on ollut maksimissaan 1800 kilometrin säteellä sääasemasta. Tällä ajanjaksolla virhemarginaali on keskimäärin ollut 7 prosenttia ja maksimissaan 14 prosenttia rannikolla mitattuihin arvoihin verrattuna.

4 Laivan ilmastointijärjestelmä

4.1 Järjestelmäkuvaus

Ilmastoinnilla tarkoitetaan ilmanvaihtoa, missä ulkoilmaa siirretään ilmanvaihtokoneiden kautta tiettyihin sisätiloihin, jotta suunnitellut ilman lämpötila ja kosteus saadaan ylläpidettyä. Ilmastointisysteemi tyypillisesti pitää sisällään ilman suodatusta, jäähdytystä, kuivausta, kostuttamista sekä tulo- ja poistoilman sekoittamista. (Tanninen 2016, 11.)

Matkustajalaivan sisätiloihin puhallettavaa ulkoilmaa jäähdytetään ilmanvaihtokoneiden jäähdytyspatterin avulla, jotka käyttävät laivan vesijäähdyttimien jäähdyttämää vettä tuloilman jäähdyttämiseen. Käytössä olevia höyrykompressorijäähdyttimiä on muutamaa eri mallia mutta toimintaperiaate kaikilla on sama. Höyrykompressorijäähdytyksessä tuloilman jäähdytykseen käytettävä vesi kiertää vesijäähdyttimen höyrystimen läpi, jossa kylmäaine ottaa lämpöenergiaa ympäröivästä nesteestä ja höyrystyy. Kylmäaineen paineenkorotus tapahtuu kompressorissa, jonka jälkeen kylmäaine virtaa lauhduttimeen. Lauhduttimessa ympäröivän nesteen lämpötila on matalampi verrattuna kylmäaineen lämpötilaan, jolloin kylmäaine luovuttaa lämpöä ympäröivään nesteeseen eli meriveteen. Lauhduttimelta kylmäaine virtaa ylipaineventtiiliin, jossa sen muuttuu takaisin höyrystettävään muotoon ja kierto alkaa alusta. Alapuolella kuvassa 12 näkyy vesijäähdyttimen toimintaprosessi.



Kuva 12. Vesijäähdyttimen toimintaprosessi. (Tanninen 2020, 32)

Höyrykompressorijäähdytin on maltillisen lämpötilavaihtelun ansiosta kokonaisvaltaisesti erittäin tehokas jäähdytysmalli. Pienet lämpötilavaihtelut kylmäaineessa saadaan aikaan kompressorilla ja paisuntaventtiilillä, jolloin prosessi on myös suotuisa Carnot-hyötysuhteen eli teoreettisen maksimihyötysuhteen kasvattamiselle. (Rakow 2019, 3.)

Vaihtoehtoinen jäähdytysmenetelmä höyrykompressorijäähdytykselle on absorptiojäähdyttimet, jotka hyödyntävät laivassa syntyvää hukkalämpöä jäähdytykseen. Hukkalämmön hyödyntämisen ansiosta prosessi on erittäin energiatehokas ja sähkönkulutus on verrattain vähäistä. Merkittävin ero höyrykompressorijäähdytykseen on laivan polttoainekulutuksen väheneminen ja ympäristöystävällisen myrkyttömän ja palamattoman kylmäaineen käyttö (Hafner ym. 2019, 55). Absorptiojäähdyttimien käyttöä rajoittaa niiden alhaisempi jäähdytysteho höyrykompressorijäähdytimeen verrattuna.

Suurin energia systeemissä kuluu raikkaan ulkoilman jäähdyttämiseen, minkä vuoksi sisätiloihin puhallettavan raikkaan ilman määrä pyritään minimoimaan. Raikkaan ilman määrä saadaan minimoitua sisätiloissa olevilla puhallinkonvektoreilla, jotka ylläpitävät ja säätelevät lämpökuormia ja ilmanlaatua kierrättämällä, suodattamalla ja jäähdyttämällä sisällä olevaa ilmaa. Poistopuhallus tapahtuu ilmanvaihtokoneiden ja erillispuhaltimien kautta. Ilmanvaihtokoneiden kautta poistuvaa ilmaa pyritään mahdollisimman paljon

siirtämään takaisin tuloilmaan erilaisten lämmöntalteenottomenetelmien avulla alueilla, joissa se on mahdollista. Sisäilman ollessa saastunutta ja kelvotonta kierrätykselle, se poistetaan erillispuhaltimien avulla suoraan takaisin ulkoilmaan.

4.2 Ilmanvaihtokoneet

Ilmanvaihtokoneen pääasiallinen tarkoitus on siirtää ilmaa kanavistoa pitkin ulkoilmasta sisätilaan ja takaisin. Koneessa olevat komponentit ja ominaisuudet riippuvat koneen tyypistä ja koneen palvelemasta tilasta mutta yleisesti ilmanvaihtokone suodattaa, jäähdyttää, lämmittää ja kuivattaa ulkoa tulevaa ilmaa, ennen ilman kulkeutumista kanavistoon. Laivassa käytettäviä ilmanvaihtokoneita löytyy kolmea eri tyyppiä, joiden erot liittyvät poistoilman käsittelyyn ja riippuvat tilasta, jota kone palvelee.

1. Kiekolliset LTO-koneet, jotka siirtävät pyörivän lämmönsiirtimeen kautta poistettavasta kertaalleen jäähdytetystä sisäilmasta lämpöä ja kosteutta ulkoilmasta otettavaan tuloilmaan. Pyörivä lämmönsiirrin siirtää herkästi myös hajuja poistoilmasta tuloilmaan, joka rajoittaa sen käyttämistä.
2. Kiertoilmakoneet, jotka kierrättävät osan poistoilmasta suoraan takaisin tuloilmaan siirtäen lämpöä ja kosteutta.
3. Suorakoneet, jotka tuovat tilaan pelkästään tuloilman ja poistoilma puhalletaan erillispuhaltimien kautta takaisin ulkoilmaan. Systeemissä ei hyödynnetä poistoilman lämmöntalteenottoa.

Yleisissä tiloissa käytettävät ilmanvaihtokoneet ovat pääasiallisesti lämmöntalteenottokiekoilla varustettuja koneita, johtuen isoista henkilömääristä ja tarvittavasta raikkaan ilman määrästä, jolloin jäähdytykseen tarvittavaa tehoa on paljon ja sitä pyritään minimoimaan. Nykyään yleisten tilojen ilmanvaihtokoneet ovat säätömahdollisuudella varustettuja, jolloin raikkaan ilman määrä säätyy tarpeen mukaan. Karkean ilmavaihtoluonnoksen hahmottelussa yleisten tilojen ilmamäärän tarve määritetään lattiapinta-alan ja henkilömäärän mukaan, johtuen tilojen epäsäännöllisestä korkeudesta ja

tilavuudesta. Tyypillinen laskennassa käytettävä tilavaraus henkilöä kohden on 2 m². (Henkilökohtainen tiedonanto 15.08.2024.)

Verrattaessa neljän matkustajalaivan pinta-aloja ja kokonaisilmamääriä keskenään, tuloksena saatiin keskiarvolta 7,7 l/s ilmamäärän tarve henkilöä kohden. Vertailu on näkyvässä alapuolella taulukossa 7.

Taulukko 7. Yleisten tilojen ilmamäärien vertailu.

	Pinta-ala [m ²]	Tuloilma [l/s]	Ilmamäärä [l/s/hlö]
Laiva 1	40 619	158 801	7,8
Laiva 2	28 637	112 771	7,9
Laiva 3	27 497	117 915	8,6
Laiva 4	20 225	64 744	6,4
Keskiarvo:			7,7

Yleiset tilat, joille on laivaerittelyssä määritetty ilmanvaihtokertoimet, karkea ilmamäärän tarve mitoitetaan huoneen tilavuuden ja annetun ilmanvaihtokertoimen tulona. Ilmanvaihtokertoimella varustettuja tiloja ovat esimerkiksi sairaalat ja tupakointihuoneet.

Hyttialueiden ilmanvaihtokoneet ovat myös lämmöntalteenottokiekolla varustettuja koneita, jotka palvelevat hyttejä, käytäviä, toimistoja ja teknisiä tiloja, joissa vakio ilmamäärä on vaadittua. Johtuen hyttialueiden ilmastoinnille asetetuista säädöksistä, ilmamäärälaskelmat jaetaan kahteen osaan (Rakow 2019, 38). Hytteihin tulevan raitisilmamäärän täytyy vähintään olla 7 l/s yhtä matkustajaa kohden tai vähintään 21 l/s hyttiä kohden. Hytin raitisilmamäärän tarve katsotaan sen mukaan, kumpi luvuista on suurempi. Hyttien lukumäärän ja henkilömäärän ollessa riippuvainen laivan koosta, on henkilömäärää yksittäistä hyttiä kohden hyvin vaikea arvioida ennen valmista yleisjärjestelyä, jolloin minimitarpeen saa laskemalla ilmamäärän 7 l/s henkilöä kohden. Taulukossa 8 verrattaessa kolmen matkustajalaivan matkustaja- ja ilmamääriä keskenään, huomataan todellisen ilmamäärän olevan huomattavan paljon suurempi matkustajaa kohden, kuin laskettuna minimi-ilmamäärällä. Vertailussa käytetyt ilmamäärät ovat hyttialueita palvelevien ilmanvaihtokoneiden ilmamääriä, jotka palvelevat hyttien lisäksi myös hyttikäytäviä ja muita pieniä

tiloja, jolloin todellinen hytteihin tuotava raitisilma on noin 70–80 prosenttia ilmoitetuista (Henkilökohtainen tiedontanto 09.10.2024).

Taulukko 8. Hyttien tuloilmamäärien vertailu.

	Kok. hlömäärä	Ilmamäärä [7 l/s/hlö]	Tod. Ilmamäärä [l/s]	Ilmamäärä [l/hlö]
Laiva 1	9 950	69 650	166 667	16,8
Laiva 2	8 376	58 632	161 567	19,3
Laiva 3	8 376	58 632	161 347	19,3
Keskiarvo:			2,6 kertainen	18,4

Taulukosta voidaan päätellä hyttien todellisen henkilökapasiteetin ja yleisjärjestelyn olevan erittäin merkityksellinen todellisen ilmamäärätarpeen laskemisessa, eikä pelkän minimi-ilmamäärän kanssa laskemista kokonaishenkilökapasiteetin perusteella voida pitää suuntaa-antavana. Hyttien ympärillä olevat tilat mitoitetaan tilavuuden ja niille määritettyjen ilmanvaihtokertoimien tulona, niiden ollessa riippumattomia henkilömäärästä. Hyttialueille kertyvä lämpökuorma poistetaan tiloissa olevien puhallinkonvektoreiden avulla, eikä lämpökuormituksen määrä vaikuta raikkaan ilmamäärän tarpeeseen (Rakow 2019, 38).

Portaikkojen ilmanvaihtokoneista matkustajaportaitoissa käytettävät koneet ovat nykyisin lämmöntalteenotolla varustettuja koneita mutta miehistöportaitoissa käytetään poistoilmantakaisinkierrätystä. Portaikkojen ilmamäärän tarve mitoitetaan tilavuuden ja ilmanvaihtokertoimien tulona. Matkustajaportaitokkojen raikkaan ilman määrä on tyypillisesti 100 prosenttia ja miehistöportaitokkojen poistoilmantakaisinkierrätys 70 prosenttia, kuitenkin ollessaan riippuvainen laivaerittelyyn kirjatuihin vaatimuksista. (Rakow 2019, 37.)

Keittiö- ja huoltotilat ovat pääsääntöisesti tiloja, joiden ilmamäärän tarve mitoitetaan tulo- ja poistoilman ilmanvaihtokertoimien avulla. Tiloja palvelevat ilmanvaihtokoneet eivät ole varustettu lämmöntalteenotolla tai poistoilmantakaisinkierrätyksellä, sisäilman ollessa tyypillisesti liian saastunutta, eikä sitä saa määräyksien puitteissa sekoittaa tuloilman kanssa. Lisäksi

poistovirtauksen tulee olla tulovirtausta suurempi, jolloin estetään saastuneen ilman kulkeutuminen yleisiin tiloihin, jotka sijaitsevat usein viereisissä tiloissa. (Rakow 2019, 37–38.)

Laivassa käytettävien ilmanvaihtokoneiden lisäksi merkittävä tekijä ilmamäärien tarkastelussa on samanaikaisuuskerroin. Samanaikaisuuskerroin määrittää systeemiin kuuluvien ilmanvaihtokoneiden yhdenaikaisen käytön tietyllä ajanhetkellä. Kertoimien merkityksen ollessa suuri, pyritään ne huomioimaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa ilmavaihtoluonnoksen suunnittelussa. Samanaikaisuuskertoimella on myös suoranainen vaikutus sen hetkiseen jäähdytystehon tarpeeseen. Alustavat kertoimet on helpointa määrittää ajanjaksoille, jotka selvästi eroavat toisistaan ja joissa ihmisten ja päätelaitteiden tuomat kuormitukset laivan sisällä kohdistuvat eri alueille, eli laivan seilatessa merellä ja ollessaan pysähtyneenä satamassa. Samanaikaisuuskertoimien määrittämiseen ei ole suoranaista kaavaa tai ohjeistusta johtuen ihmismassojen liikkeen ja olosuhteiden ennalta- arvaamattomuudesta ja vakiintumattomuudesta, jolloin parhaimmat arviot kertoimista ovat suuntaa antavia ja perustuvat aikaisempiin laivoihin sekä kokemuspohjaiseen tietoon. (Henkilökohtainen tiedonanto 15.08.2024.)

Taulukko 9. IV-koneiden samanaikaisuuskertoimien vertailu

Tila	Ryhmä	Laiva 1		Laiva 2		Laiva 3		Keskiarvo:
		Satama	Merellä	Satama	Merellä	Satama	Merellä	
		Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	
Hytit	Hytit	95	95	-	95	95	95	95
Yleiset	LTO:lla	50	65	-	65	50	65	59
	Ilman LTO:ta	50	65	-	65	50	65	59
	Sairaala	95	95	-	95	95	95	95
Keittiöt ja huolto	Keittiöt, pesulat	50	65	-	65	50	65	59
	Varstot	95	95	-	95	95	95	95
Portaikot	Matkustaja	95	95	-	95	100	85	94
	Miehistö	95	95	-	80	95	95	92

Yllä olevassa taulukossa 9 on vertailtuna kolmen matkustajalaivan jäähdytyskapasiteetilaskennassa käytettyjä samanaikaisuuskertoimia. Yhteenvedona voidaan todeta suurimman vaihtelun olevan yleis- ja keittiötiloissa, mikä on loogista ajatellen miehistön ja matkustajien toimintaa tiloissa eri ajanhetkillä.

4.3 Puhallinkonvektorit

Puhallinkonvektoreiden hyödyntäminen osana ilmastointisysteemiä tuo merkittäviä säästöjä energiankulutukseen ja antaa mahdollisuuden laivan sisätilojen hyötykäytön kasvattamiselle mutta luo myös monimutkaisuutta ja haasteellisuutta ilmastoinnin toteutukseen. Sisäilmalle määritetyt raikkaan ilman osuudet toteutetaan ilmanvaihtokoneilla pienimmillä vaadituilla ilmamäärillä, jolloin energiankulutus ulkoilman jäähdyttämiseen saadaan minimoitua. Sisätiloihin tuotava raikas ilma ei kuitenkaan kykene kumoamaan lämpökuormia, eikä toteuttamaan vaadittua ilmanvaihtuvuutta, jonka vuoksi huonekohtaisia puhallinkonvektoreja käytetään. (Rakow 2019, 27.)

Matkustajalaivoissa puhallinkovektoreja käytetään pääsääntöisesti yleisissä tiloissa, hyttialueilla, toimistoissa ja teknisissä tiloissa. Toimintaperiaate koneella on hyvin vastaavanlainen ilmanvaihtokoneen kanssa, joka kierrättää osan poistoilmasta takaisin tuloilmaan. Tilassa olevaa ilmaa kierrätetään koneessa olevan puhaltimen avulla, jolloin se kulkee suodattimen läpi ja sitä voidaan tarvittaessa jäähdyttää vesijäähdytyspatterin avulla tai lämmittää sähkövastuksen avulla. Tyypillisesti vain hyteissä olevat puhallinkonvektorit ovat varustettu sähkövastuksella ja suuremmissa tiloissa lämmitystarpeen tullen tuloilma lämmitetään ilmanvaihtokoneessa. (Henkilökohtainen tiedonanto 02.08.2024.) Lisäksi hyteissä oleville koneille tulee erillinen kanava suoraan ilmavaihtokoneelta, jota kautta hyttiin tuodaan tarvittava raitisilma.

Lämpökuormien ollessa riippuvaisia ulkoilman lämpötilasta, auringon säteilystä, varjostuksista, ihmismäärästä, seinämateriaaleista, valaistuksesta ja käytettävistä laitteista on todellisen kuormituksen arviointi ja keskinäinen vertailu hyvin haasteellista. Aiheesta tehdyn haastattelun tuloksena selvisi, että yleis- ja teknisissä tiloissa puhallinkonvektoreiden ilmamäärien arviointiin käytetty arvo on 5 l/m². Alapuolella taulukossa 10 tehdyn vertailun perusteella, huomataan ilmamäärien olevan yleistiloissa hiukan alle ilmoitetun.

Taulukko 10. Yleistilojen puhallinkonvektoreiden ilmamäärät.

	Laiva 1	Laiva 2	Laiva 3	
Pinta-ala:	40 619	28 637	27 497	[m ²]
Ilmamäärä:	191 667	140 278	129 722	[l/s]
Ilmamäärä:	4,72	4,90	4,72	[l/m ²]

Matkustajien ja miehistön hyteissä tarvittava ilmamäärän arviointi on huomattavasti haasteellisempaa, johtuen useista erilaisista hyttityypeistä ja sijoittelusta ympäri laivaa. Hyteissä suurimmat lämpökuormitukset aiheutuvat ihmisistä sekä ikkuna- ja parvekelaseista, jotka eristävät lämpösäteilyä huonosti. Johtuen hyttityyppien, jäähdytystehon, ilmamäärien ja lämpökuormitusten suuresta vaihtelusta, hyttityypit jaettiin kolmeen

pääluokkaan ja pyrittiin löytämään jokaiselle tyyppille kerroin, käyttämällä tilavuuden ja ilmamäärän keskiarvotuloksia. Alapuolella taulukossa 11 näkyy vertailu hyttityyppien ilmanvaihtokertoimista.

Taulukko 11. Hyttityyppien ilmanvaihtokertoimien vertailu.

		Laiva 1	Laiva 2	Laiva 3	Laiva 4	
Parveke & ikkuna	Osuus	81	96	95	89	[%]
	Tilavuus	39,4	31,7	34,4	32,0	[m3]
	Ilmamäärä	230,0	176,0	190,0	131,6	[m3/h]
	Vaihtokerroin	5,8	5,5	5,5	4,1	5
Sisä	Osuus	89	96	92	84	[%]
	Tilavuus	33,2	23,1	23,1	34,0	[m3]
	Ilmamäärä	124,0	81,7	77,5	39,7	[m3/h]
	Vaihtokerroin	3,7	3,5	3,4	1,2	3
Miehistö	Osuus	81	87	86		[%]
	Tilavuus	17,7	15,2	15,8	-	[m3]
	Ilmamäärä	52,5	95,0	95,0	-	[m3/h]
	Vaihtokerroin	3,0	6,3	6,0	-	5

Hyttityypit jaettiin luokkiin parveke- ja ikkunahytit, sisähytit ja miehistöhytit. Tämän tyyppinen jaottelu on mahdollista luokkien sisällä olevien hyttien riittävästä yhdenvertaisuudesta. Vertailussa ei ole huomioitu sviittejä, niiden yksilöllisyydestä ja vähäisestä määrästä johtuen. Taulukon osuus-rivillä näkyy vertailussa huomioitu määrä, laivan yleisjärjestelyssä kyseisellä nimityksellä olevien hyttien määrästä. Kokonaisuudessaan erilaisia hyttityyppejä verrattiin laivasta riippuen 6–15 erilaista, huomioiden lukumääriltään eniten esiintyvät hyttityypit, jonka vuoksi osuus ei ole 100 prosenttia. Vertailun tuloksena saatiin suuntaa antavat keskiarvokertoimet ilmamäärälle hytin tilavuuteen nähden.

Ilmanvaihtokoneiden lisäksi myös puhallinkonvektoreille määritetään samanaikaisuuskertoimet. Verrattuna IV-koneiden samanaikaisuuskertoimien vaihteluun meri- ja satama-ajankohtina, puhallinkonvektoreiden kertoimissa vaihtelu on selkeästi suurempaa. Taulukko 12 puhallinkonvektoreiden samanaikaisuuskertoimista näkyy alapuolella.

Taulukko 12. Puhallinkonvektoreiden samanaikaisuuskertoimien vertailu.

	Laiva 1		Laiva 2		Laiva 3		Keskiarvo:
	Satama	Merellä	Satama	Merellä	Satama	Merellä	
Tila	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	Kerroin [%]	
Yleiset	40	55	-	55	40	55	49
Tekniset	50	80	-	80	50	80	68
Hytit (matk.)	40	55	-	55	40	55	49
Hytit (mieh.)	40	55	-	80	80	80	67

4.4 Jäähdytys- ja puhallintehon mitoitus

Ilmastointilaitoksen jäähdytys- ja puhallintehoa voidaan mitoittaa tiedossa olevien sisä- ja ulkoilmaolosuhteiden, laitteiden hyötysuhteiden ja tarvittavien ilmamäärien perusteella. Tarvittava jäähdytysteho saadaan selville kostean ilman Mollier-piirroksesta. Alapuolella kuvassa 13 on esitetty jäähdytystarpeen mitoitus ulkoilmalämpötilan ollessa + 30 °C astetta ja halutun sisälämpötilan ollessa + 22 °C astetta. Ulkoilmasta otettava raitisilma jäähdytetään ilmanvaihtokoneessa noin + 11 °C asteen lämpötilaan, jolloin suhteellinen kosteusprosentti asettuu 100 % ja IV-koneelta sisätiloihin lähtevä ilma on noin + 12 °C asteista. Ilman LTO-kiekon tai poistoilman takaisinkierrätyksen hyödyntämistä, tuloilmamäärän ollessa 100 000 m³/h jäähdytysteho lasketaan seuraavasti:

$$Jäähdytysteho = \frac{100\,000 \frac{m^3}{h}}{3600} = * 1,2 \frac{kg}{m^3} * \left(93 \frac{kJ}{kg} - 32 \frac{kJ}{kg} \right) = 2033 kW \quad (1)$$

jossa

1,2 kg/m³ on Ilman tiheys

93 kJ/kg on ulkoilman entalpia

32 kJ/kg on jäähdytetyn ilman entalpia

Kaavassa 1 ilman tiheyden muutosta ulko – ja sisäilman entalpioiden välillä ei ole huomioitu ollenkaan, vaan on käytetty vakio ilman tiheyttä $1,2 \text{ kg/m}^3$, joka toteutuu normaali ilmanpaineessa ilman lämpötilan ollessa noin $20 \text{ }^\circ\text{C}$ asteen lämpötilassa. Ilman tiheyden muutokseen vaikuttavat ilmanpaine, lämpötila ja kosteus, jolloin ilman entalpian ollessa riippuvainen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden määrästä on ilman entalpialla epäsuora vaikutus ilman tiheyteen. Eri entalpioiden ilman tiheyksiä ja niiden vaikutusta jäähdytystehoon on tutkittu alapuolella olevassa yhtälössä, jossa lähtöarvot ovat muilta osin saman suuruiset. Yhtälössä käytettyjen entalpioiden lämpö- ja kosteusarvot ovat näkyvissä alapuolella kuvassa 13.

$$\text{Jäähdytysteho} = \frac{100\,000 \text{ m}^3/\text{h}}{3600} * \left(\frac{1,142 \text{ kg/m}^3 + 1,236 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \right) * \left(93 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 2015 \text{ kW} \quad (2)$$

jossa

1,142 kg/m^3 on ulkoilman tiheys

1,236 kg/m^3 on jäähdytetyn ilman tiheys

Ilman tiheyden muutos huomioiden jäähdytystehon määrä pieneni 15 kW eli noin 0,9 prosentilla, jolloin voidaan todeta tiheyden muutoksen huomioimisen olevan merkityksetöntä tämän suuruusluokan tarkastelussa.

Ilmanvaihtokone, jossa on käytössä LTO-kiekko 60 % hyötysuhteella ja tuloilmamäärän ollessa yhtä suuri, jäähdytysteho lasketaan:

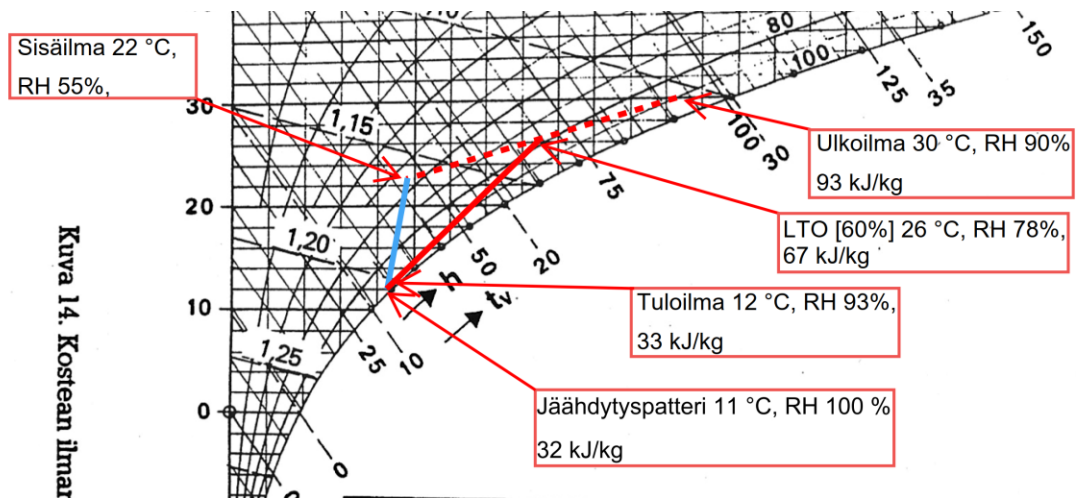
$$\text{Jäähdytysteho} = \frac{100\,000 \text{ m}^3/\text{h}}{3600} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(67 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 1166 \text{ kW} \quad (3)$$

jossa

67 kJ/kg on ulkoilman entalpia LTO-kiekon jälkeen

Laskettujen jäähdytystehojen tuloksista huomataan LTO-kiekon merkitys systeemissä. Ulkoilman jäähdyttäminen ilman lämmöntalteenottoa tai takaisinkierrätystä kuluttaa lähes puolet enemmän tehoa. Laivan ilmanvaihtokoneiden kautta kulkeva ilmamäärä on usein kymmenkertainen

esimerkkiin verrattuna, jolloin puhutaan energiankulutuksen kannalta suurista lukemista.



Kuva 14. Kostean ilman

Kuva 13. Jäähdytystehon mitoitus Mollier-piirroksesta.

Puhallinkonvektoreiden toiminnan perustuessa sisällä olevan ilman ylläpitämiseen, niiden jäähdytystehoja ei voida laskea ulkoilman ja jäähdytyspatterin entalpiamuutoksesta vaan sisällä olevan ilman ja jäähdytyspatterin entalpiamuutoksesta. Sisätiloissa olevien lämpökuormien takia mitoituksessa käytettävä sisäilman lämpötila on muutaman asteen suunniteltua lämpötilaa korkeampi. Puhallinkonvektorin jäähdytysteho tilan pinta-alan ollessa 7500 m² ja tilälämpötilan ollessa + 25 °C astetta lasketaan:

$$\text{Jäähdytysteho} = \frac{7500 \text{ m}^2 \cdot 5 \text{ l/m}^2}{1000} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \left(50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 32 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) = 810 \text{ kW} \quad (4)$$

jossa

5 l/m² on ilmamäärä neliometriä kohden

50 kJ/kg on tilälämpötilan entalpia

Puhallintehon laskemiseksi tulee tietää tilaan tulevan tuloilman määrä, puhaltimen hyötysuhde ja haluttu paineenkorotus kanavistossa. Puhaltimen hyötysuhde on laitekohtainen mutta tyypillisesti hyötysuhteet ovat 65 – 75 % välillä (Tuomarmäki, kurssimateriaali 2023). Ilmamäärän ollessa 100 000 m³/h,

paineenkorotus 2300 Pa ja puhaltimen hyötysuhde 70 %, puhallinteho lasketaan seuraavasti:

$$Puhallinteho = \frac{\left(\frac{100\,000 \frac{m^3}{h}}{3600}\right) * 2300 \text{ Pa}}{0,7 * 1000} = 91 \text{ kW} \quad (5)$$

jossa

2300 Pa on haluttu paineenkorotus

0,7 on puhaltimen hyötysuhde (70 %)

Kokonais jäähdytys- ja puhallintehon ilmastointilaitoksen ilmanvaihtoluonnosta varten saadaan laskemalla yhteen kaikkien ilmanvaihtokoneiden ja puhallinkonvektoreiden lasketut teholutemat halutuille olosuhteille.

5 Excel-laskin

Opinnäytetyön toimeksiantajan Meyer Turku Oy:n toimeksianto ja opinnäytetyön yksi tavoitteista oli luoda excel-laskin, jonka avulla olisi mahdollista arvioida laivan hotellitilojen jäähdytys- ja puhallintehon määrää laskimeen syötettyjen arvojen perusteella. Laskin ja siihen syötettävät arvot perustuvat opinnäytetyössä tutkittuihin ja esitettyihin asioihin. Laskimessa järjestelmän mitoitus aloitetaan valitsemalla, minkä vuoden säädataa laskentaan halutaan hyödyntää. Tämän jälkeen käyttäjä valitsee kuukauden tarkkuudella merialueet, missä laivan halutaan operoivan. Tällä pyritään simuloimaan ilmastointijärjestelmälle vuoden aikana vastaantulevat olosuhteet. Laskimessa on mahdollista jättää myös merialue valitsematta halutuille kuukausille, mikäli laivan ei ole tarkoitus operoida ympärivuotisesti. Säädatan ja simuloitun reitin jälkeen laskin ilmoittaa käyttäjälle simuloimallaan reitillä suurimman toteutuvan entalpia-arvon, sekä tällä entalpia-arvolla toteutuvan ilmanlämpötilan ja suhteellisen kosteuden. Lisäksi laskin ilmoittaa päivämäärän ja merialueen, jolla olosuhteet toteutuvat. Näiden jälkeen käyttäjän on mahdollista säätää ilmoitettua lämpötilaa ja suhteellista kosteutta haluamaansa suuntaan ja lopullinen laskenta tapahtuu näiden arvojen perusteella. Mikäli käyttäjä ei halua muuttaa arvoja, laskenta tapahtuu simuloitun reitin antamilla arvoilla. Laivan sisätiloihin halutut olosuhteet valitaan ilmanlämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Syötetyistä arvoista laskin laskee sisäilman entalpia-arvon ja lisäksi näyttää ulko- ja sisäilman entalpioiden erotuksen.

Laskimeen määritettyjen olosuhteiden jälkeen laskimeen syötetään tarvittavat mitat jokaiselle mitoitettavalle tilalle. Laskimeen sisällytetyt pääalueet ovat samat, jotka ovat kerrottuna opinnäytetyön luvussa 3.3 *Jäähdytettävät alueet*. Jokaisen alueen sisälle on mahdollista mitoittaa neljä eri tyyppistä tilaa, mikäli saman alueen sisällä hyödynnetään esimerkiksi useampaa eri lämmöntalteenottomenetelmää. Jokainen tila voidaan määrittää lattiapinta-alaan ja henkilömäärään perustuen tai tilavuuden ja ilmanvaihtokertoimien tuloon perustuen. Mittatietojen lisäksi laskimeen syötetään laitteiden

samanaikaisuuskertoimet, LTO:n hyötysuhde, haluttu paineenkorotus ja puhaltimen hyötysuhde. Syötettyjen arvojen perusteella laskin ilmoittaa jokaisen tilan tuloilmamäärän, puhallintehon sekä jäähdytystehon.

Puhallinkonvektorien mitoitus tapahtuu kahdella tavalla. Yleis- ja teknisten tilojen puhallinkonvektorien ilmamäärät ja jäähdytysteho mitoitetaan lattiapinta-alaan ja ilmamäärä/m² perustuen. Hyttipuhallinkonvektorien ilmamäärät ja jäähdytystehot määräytyvät ilmoitettujen matkustaja- ja miehistökapasiteetin ja näiden välisen suhteen perusteella. Laskin ilmoittaa hyttien lukumäärät perustuen matkustaja- ja miehistökapasiteettiin, jonka jälkeen laskimeen kerrotaan hyttityyppien tilavuudet ja ilmanvaihtuvuuskerroimet. Myös puhallinkonvektoreille voidaan määrittää samanaikaisuuskertoimet ja lopuksi laskin kertoo ilmamäärät ja jäähdytystehot puhallinkonvektoreille.

Laskimeen syötettyjä pinta-aloja sekä laskettuja ilmamääriä ja teholumkia lasketaan jatkuvasti yhteen, jolloin käyttäjälle näkyy laivan kokonaisilmamäärät ja jäähdytys- ja puhallintehot mitoituksen yhteydessä. Lisäksi laskin piirtää graafia, josta nähdään vuoden aikana toteutuvien entalpia-arvojen sekä jäähdytystehojen profiili. Laskimen käytön tueksi laskimeen on sisällytetty huomioita ja ohjeistuksia, jotka esiintyvät automaattisesti käyttäjän tekemien valintojen mukaan sekä on laadittu käyttöohjeet mitoitusta varten. Sekä laskin, että käyttöohjeet ovat Meyer Turku Oy:n omaisuutta ja ovat erillisiä liitetiedostoja sekä toimeksiantajan vaatimuksesta salattuja.

6 Yhteenveto & pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia risteilylaivan ilmastointilaitoksen jäähdytys- ja puhallintehoon vaikuttavia tekijöitä ja selvittää, miten suunnitteilla olevan laivan tehontarpeita voitaisiin arvioida hyvin varhaisessa vaiheessa projektia olevilla tiedoilla ja lasketuilla mitta-arvoilla. Opinnäytetyössä tutkittiin ja kerrottiin säännöistä ja määräyksistä sekä muuttujista, jotka vaikuttavat laivan ilmastointisysteemin suunnitteluun ja toimintaan sekä kuvattiin pääpiirteittäin systeemin toimintaperiaate ja siihen liittyvien pääkomponenttien toiminta ja niiden väliset vuorovaikutukset systeemissä. Kirjallisen tutkimustyön lisäksi työssä vertailtiin 3 - 5 eri lylaivaa keskenään, tavoitteena löytää yhtäläisyyksiä, toistuvuuksia ja kertoimia laivoissa olevien tilojen ja ilmastointilaitosten välillä. Työn tuloksena opinnäytetyön toimeksiantajalle laadittiin excel-laskin, jolla voidaan arvioida jäähdytys- ja puhallintehon määrää tietyn kokoisella laivalla, halutuissa toimintaolosuhteissa. Lisäksi laskimen käytettävyyden helpottamiseksi laadittiin erillinen käyttöohje, joka kertoo vaiheittain laskennan etenemisestä ja tukee laskimen käytössä.

Opinnäytetyön aihe valittiin sillä ajatuksella, että siitä olisi todellista hyötyä toimeksiantajalle ja niin, että se edistäisi myös opinnäytetyöntekijän tietämystä ja ammattitaitoa asiaan liittyen. Toimeksiantajalla ei vielä ennen tämän tutkimustyön valmistumista ollut vastaavanlaista laskinta käytössään. Suurimmat haasteet työssä olivat aiheen rajaaminen ja määritetyllä tarkkuudella pysyminen. Työtä tehdessä tuli useasti vastaan tilanteita, joissa sen hetkisellä tarkkuudella tutkiminen tuntui liian suuntaa antavalta mutta asian tarkempi tutkiminen olisi kasvattanut työmäärää merkittävästi, erinäisten muuttujien ollessa jatkuvasti monialaisempia. Työssä suoritettuun vertailuun valitut laivat valittiin siten, että ne olisivat keskenään mahdollisimman erilaisia kokonsa, ominaisuuksien, asiakaskohderyhmän, operointiolosuhteiden, teknisen erittelyn ja omistajayhtiön osalta mutta, että niistä olisi kuitenkin tietoa kattavasti saatavilla, olisivat luokitukseltaan risteilylaivoja ja ne olisivat rakennettu noin 10 vuoden sisällä. Näiden kriteerien jälkeen vertailuun valittiin 5 eri laivaa, joiden

tietoja käytettiin vaihtelevasti ja mahdollisuuksien mukaan. Vertailuista olisi saatu mahdollisesti laadukkaampia, mikäli otanta olisi ollut suurempi ja vaihtelua ja inhimillisesti saatavilla olevaa dataa olisi ollut enemmän.

Haasteelliseksi osoittautui myös halutunlaisen säädatan löytäminen, sillä olosuhteiden vertailuun ja excel-laskimeen ei riittänyt pelkästään ajantasainen tieto paikallisista olosuhteista, vaan dataa haluttiin kerätyssä muodossa vähintään kokonaisen vuoden ajalta ja vähintään niiltä merialueilta, joissa risteilytoimintaa on kaikkein eniten. Alusta lähtien oli selvää, että merialueilta dataa ei ole saatavilla sääasemien puutteellisuudesta johtuen, joten mittauspisteet pyrittiin löytämään mahdollisimman läheltä rannikkoa. Tällaisen palveluntarjoajan löytäminen oli haasteellista. Halutunlaisen datan löydyttyä oli positiivista huomata, miten pieni virhemarginaali rannikolta mitatun datan ja risteilylaivan päältä mitatun datan välillä on, kun näiden kahden sääaseman arvoja verrattiin keskenään kuukauden ajanjaksolta yhdellä merialueella.

Opinnäytetyön tekeminen sujui kokonaisuudessaan mielestäni hyvin haasteista huolimatta ja tämän työn edistämisen eteen tehty työ antoi minulle paljon enemmän, kuin mitä lukijalle välittyy opinnäytetyötä lukiessaan. Työ suoritettiin osaltaan kirjallisuuskatsauksena, hyödyntäen aiheesta tehtyjä opinnäytetöitä ja tietokirjallisuutta mutta suuri osuus työstä oli lukujen ja arvojen vertailua, joista aiempaa tutkittua kirjallisuutta ei ole saatavilla. Työssä hyödynnettiin myös alalla työskentelevien ammattilaisten kokemusperäistä tietoa, jota saatiin keskustelujen ja esitysten tuloksena. Kokemusperäisen tiedon merkitys osoittautui työtä tehdessä yllättävän suureksi. Työlle asetetut tavoitteet täyttyivät niille rajattujen vaatimusten tasolla ja tämä työ antaa hyvän pohjan kehittämiselle niin tehdyn laskimen, kuin tarkempien jatkotutkimusten osalta.

Lähteet

Cruise Lines International Association, 2024. State of the Cruise Ship Industry Report. Viitattu 10.06.2024 <https://cruising.org/en-gb/news-and-research/research/2024/april/2024-state-of-the-cruise-industry-report>

DNV AS rules for classification. 2024. Part 6 Additional class notations. Chapter 8 Living and working conditions. Norway.

International Organization for Standardization n.d ISO 7547:2022. Ships and marine technology - Air Conditioning and ventilation of accommodation spaces and other enclosed compartments on board ships – Design conditions and basis of calculations. Viitattu 15.07.2024

<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:7547:ed-3:v1:en>

Suomen standardisoimisliitto, 2005. ISO 7547:2002. Suomen teknologiateollisuus.

Met Office n.d. Weather & climate. Climate zones. Viitattu 12.06.2024 <https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate/climate-explained/climate-zones>

Rakow, J. 2019. Development of a guidance for the initial estimation of the HVAC system on medium size and large size cruise ships. Diplomityö. Laivanrakennus- ja meritekniikka. Bremen: Bremen yliopisto.

Tanninen, T. 2016. A design guideline for a cruise ship air conditioning system. Opinnäytetyö (AMK). Kone- ja tuotantotekniikka. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Tanninen, T. 2020. Passenger ship refrigeration – Dimensioning and energy saving options. Diplomityö. Energiatekniikka. Lappeenranta: Lappeenrannan yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020091869999>

Tuomarmäki, T. 2023. Kurssimateriaali pumpput, puhaltimet, putkistot ja kanavat. Turun ammattikorkeakoulu.

Visual Crossing. 2024. Weather data service. Viitattu 10.7.2024. <https://www.visualcrossing.com/weather/weather-data-services>

Vuorela, T. 2000. Laivan Ilmastointijärjestelmän perussuunnittelu ja mitoitus. Diplomityö. Energiatekniikka. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

W.Fisher, K. 2008. Fundamentals of Shipbuilding Contracts. Fisher Maritime Consulting Group. Florham Park, New Jersey, USA.