

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

RISTEILYALUKSEN PUHALLINSANEERAUKSEN OPTIMOINTI

TEKIJÄ Nella Ojanen

| | | | |
|--|----------|-----------|----|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | | | |
| Tutkinto-ohjelma Konetekniikan tutkinto-ohjelma | | | |
| Työn tekijä Nella Ojanen | | | |
| Työn nimi Risteilyaluksen puhallinsaneerauksen optimointi | | | |
| Päiväys | 5.4.2024 | Sivumäärä | 31 |
| Toimeksiantaja Koja Oy | | | |
| Tiivistelmä | | | |
| <p>Merenkulkuala on globaalisti yksi merkittävimmistä kasvihuonekaasujen päästölähteistä ja risteilyt nopeimmin suositaan kasvattava kansainvälisen turismin muoto. On siis selvää, että uudet innovaatiot ja teknologinen kehitys kohti ympäristöystävällisempää merenkulkua on välttämättömyys hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamiseksi. Ilmanvaihtojärjestelmät koostavat risteilyalusten energiankulutuksesta kolmanneksen, joten niitä voidaan tarkastella potentiaalisina kohteina energiaa säästäviä kohteita mietittäessä. Ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuutta voidaan tarkastella monesta eri näkökulmasta. Tämän työn tavoitteena oli tarkastella erityyppisten puhaltimien energiatehokkuutta osana risteilyaluksen ilmanvaihtojärjestelmiä ja selvittää millaisia vaikutuksia puhallinvalinnan optimoinnilla voitaisiin saavuttaa. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Koja Oy.</p> <p>Työssä perehdyttiin risteilyalusten ilmanvaihtojärjestelmiin, puhaltimien ja ilmanvaihdon toimintaperiaatteisiin sekä puhaltimien mitoittamiseen. Työn aineistona käytettiin rajatusti saatavilla olevaa julkista aineistoa, yrityksen sisäisiä käyttöönottodokumentteja ja mittauksia sekä ulkoisen puhallinvalmistajan puhallinmitoitusohjelmaa.</p> <p>Työn tuloksena syntyi helppokäyttöinen ja nopeasti eri aluksille yksilöitävä laskentatyökalu, joka puhallinvertailun lisäksi tuottaa laskelmat säästöistä energian- ja polttoaineenkulutuksessa sekä kasvihuonekaasujen päästöissä. Laskentatyökalulla on mahdollista laskea myös puhallinsaneerauksen kokonaishinta ja tuotettavat säästöt sekä saneerauksen takaisinmaksuaika. Tutkielman tuloksena on aineisto, joka toimii myös perehdyttävänä aineistona puhallinvertailuun sekä energiatehokkuuden laskentaan.</p> | | | |
| Avainsanat energiatehokkuus, ilmapölyratkaisut, puhallinvalinnan optimointi, puhallinsaneeraus | | | |

| | |
|--|-------------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | |
| Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering | |
| Author Nella Ojanen | |
| Title of Thesis Optimization of Fan Renovation for a Cruise Ship | |
| Date 5 April 2024 | Pages 31 |
| Client Organisation Koja Ltd. | |
| <p>Abstract</p> <p>Globally, the shipping industry is one of the significant sources of greenhouse gas emissions, and cruises are the fastest growing form of international tourism. It is therefore clear that new innovations and technologies are vital for achieving the goals of carbon neutrality. As HVAC is responsible for a third of the total energy consumption of cruise ships, it is a potential target for energy saving technologies. Even though it is possible to look at the energy efficiency of ventilation systems from different perspectives, the aim of this work was to examine the energy efficiency of different types of fans as part of cruise ship HVAC-systems and to find out what kind of effect could be achieved by optimizing fan selection. The thesis was commissioned by Koj Ltd.</p> <p>Ventilation systems of cruise ships, the operating principles of fans and ventilation, and the dimensioning of fans were studied for this thesis. Background information was gathered from limitedly available public resources, the client organization's internal commissioning documents and measurement protocols, as well as the fan selection tool offered by external fan manufacturer.</p> <p>As a result of the work, an easy-to-use and quickly individualizable calculation tool for different ships was created, which, in addition to fan comparison, produces calculations of savings in energy and fuel consumption together with greenhouse gas emissions. It also calculates the total cost of the fan renovation and the achievable savings, as well as the payback time of the renovation. This thesis and calculation tool could also be used as introductory material for comparing fans and calculating energy efficiency.</p> | |
| <p>Keywords energy efficiency, air handling solutions, optimized fan selection, fan renovation, HVAC</p> | |

ESIPUHE

"Ja niin kääntyi lehti, elämässäni oli alkamassa uusi luku. Maata näkyvässä, suuri yksinäisen saari keskellä merta!"

Niin tokaisi Muumipappa, kirjassa Muumipapan urotyöt (Jansson 2010). Tässä vaiheessa myös minun elämässäni on alkamassa uusi luku. Yksi ura takana, nyt toinen edessä. Haluan kiittää opinnäytetyön toimeksiantajaa sekä työnantajaani Koja Oy:tä. Sieltä tarjoutui elämäni ensimmäinen kesätyöpaikka vuosina 2012 ja 2013. Elämäni vei kuitenkin hetkeksi toisille urille, kunnes pandemian myötä oli aika kouluttautua uudelle alalle. Ja niin kymmenen vuotta myöhemmin, vuonna 2023, ympyrä sulkeutui aloittaessani harjoitteluni jo tutulla työnantajalla.

Harjoitteluun lähtiessäni takki taskuineen oli tyhjä. Nyt reilua vuotta myöhemmin ovat taskut täyttyneet valtavasta määrästä uutta ja innostavaa. Kiitos siitä kuuluu minut ympäröineille tuotekehityksen tiimiläisille, jotka alusta asti ovat noviisia neuvoneet, auttaneet ja kannustaneet. Erityinen kiitos esihenkilölleni Antti Häyryselle uskosta ja luottamuksesta tekemiseeni sekä mahdollisuudesta etsiä ammatillista itseäni keskellä tuntematonta. Kiitos opinnäytetyön aikana saaduista neuvoista Teemu Tanniselle, Mika Lehtoselle ja Jere Vähämäelle sekä pohjaavan erikoistumisprojektin aikana saaduista opeista ja kannustuksesta Taru Lähteenmäelle.

Haluan myös kiittää perhettäni ja ystäviäni, jotka ovat aina kuunnelleet ja tukeneet oikeina hetkinä. Kiitos myös miehelleni Joni Monoselle tekniikan maailman opeista sekä erityisesti tuesta opintojen ja opinnäytetyön aikana.

Viimeisenä haluan kiittää isääni. Teit suuresti arvostettavan 40-vuotisen uran Kojalla, jonka aikana kerrytit valtavan tietotaidon ja osaamisen, joista jaoit minullekin eväitä opintoihini ja työuralleni. Matkasi päättyi tänä keväänä – aivan liian aikaisin. Et ehtinyt opinnäytetyötäni lukemaan tai valmistamistani juhlimaan, mutta tiedän sinun olleen minusta ylpeä.

Tampereella 5.4.2024



Nella Ojanen

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 9 |
| 2 | SIDOSRYHMÄT..... | 10 |
| 2.1 | Koja Group & Koja Oy | 10 |
| 2.2 | Savonia-ammattikorkeakoulu | 10 |
| 3 | ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSET RISTEILYALALLA..... | 11 |
| 3.1 | Hiilineutraaliustavoitteet | 11 |
| 3.2 | Ilmanvaihtojärjestelmien merkitys risteilyalusten energiankulutuksessa | 12 |
| 4 | AJOPROFIILI..... | 14 |
| 4.1 | Quantum Of The Seas | 14 |
| 4.2 | Ajoprofiili..... | 14 |
| 4.3 | Polttoaineen kulutus..... | 15 |
| 5 | ILMANVAIHTO RISTEILYALUKSILLA | 16 |
| 5.1 | Toiminta-alueet | 16 |
| 5.1.1 | Hytit | 16 |
| 5.1.2 | Julkiset tilat..... | 17 |
| 5.1.3 | Toimitilat..... | 17 |
| 5.1.4 | Portaikot | 17 |
| 6 | PUHALTIMET | 18 |
| 6.1 | Vanhat puhaltimet | 19 |
| 6.2 | Uudet puhaltimet | 20 |
| 7 | PUHALLINVERTAILU | 21 |
| 7.1 | Menetelmät | 21 |
| 7.2 | Puhallinvertailun tulokset..... | 21 |
| 7.3 | Excel-laskentatyökalu | 22 |
| 8 | PUHALLINSANEERAUKSEN VAIKUTUKSET | 24 |
| 8.1 | Lähtötiedot | 24 |
| 8.2 | Taloudelliset säästöt..... | 24 |
| 8.3 | Takaisinmaksuaika | 27 |
| 8.4 | Päästövaikutukset | 28 |
| 9 | YHTEENVETO..... | 29 |
| | LÄHTEET | 30 |

KUVALUETTELO

| | |
|--|----|
| Kuva 1. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennysstrategian kaavio (DNV 2023)..... | 12 |
| Kuva 2. Quantum Of The Seas 'Alaska Adventure Cruise'-reitti (CruiseMapper 2024) | 14 |
| Kuva 3. Ilmanvaihtojärjestelmän alueiden jakautuminen (Tanninen 2023) | 16 |
| Kuva 4. Puhallintyytit: keskipakois-, aksiaali- ja puoliakiaalipuhallin (Sandberg 2016a, 148)..... | 18 |
| Kuva 5. FläktWoods GXHB-puhallin (FläktWoods julkaisuaika tuntematon)..... | 19 |
| Kuva 6. ebm-papst RadiPac-puhallin (ebm-papst 2022) | 20 |
| Kuva 7. Puhallinhyötysuhteiden muutokset suhteessa ilmamäärään ja staattiseen paineeseen | 22 |
| Kuva 8. Risteilyaluksen polttoaineen jakautuminen eri sovellutuksiin (Tanninen 2023)..... | 26 |
| Kuva 9. Diagrammi 1 polttoaineen kulutuksesta ja säästöistä | 26 |
| Kuva 10. Diagrammi 2 polttoaineen kulutuksesta ja säästöistä | 27 |

TAULUKKOLUETTELO

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Merenkulun synnyttämät päästöt vuosina 2012–2018 (IMO 2020, 2)..... | 11 |
| Taulukko 2. Quantum Of The Seas 'Alaska Adventure Cruise'-aikataulu | 15 |
| Taulukko 3. Kasvihuonekaasupäästöjen säästöt | 28 |
| Taulukko 4. MGO _{0.1} päästökertoimet..... | 28 |

LYHENTEET

AHU = *Air Handling Unit*, suurempi ilmakäsittelylaite, joka sijaitsee AC-huoneessa ja jonka tehtävänä on tuoda raitisilma ulkoa ja ohjata poistoilma ulos

CLIA = *Cruise Lines International Association*, risteily-yhtiöiden kansainvälinen yhdistys

CO_{2e} = *Carbon Dioxide Equivalent* eli hiilidioksidiekvivalentti, kasvihuonekaasujen yhteismitta, joka kuvaa kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua vaikutusta

DBV = *Demand Based Ventilation* eli tarpeenmukainen ilmanvaihto, jossa ilmanvaihtojärjestelmässä säädellään ilmamäärää kuormituksen tai ilmanlaadun perusteella

DNV = *Det Norske Veritas*, monialainen ja kansainvälinen akkreditoitu rekisterinpitäjä ja luokituslaitos, jonka pääkonttori sijaitsee Høvikissa, Norjassa

EGCS = *Exhaust Gas Cleaning System* eli pakokaasujen puhdistusjärjestelmä

FCU = *Fan Coil Unit*, pienempi ilmakäsittely-yksikkö, jonka tehtävänä on kierrättää ja säädellä sisätilojen ilmaa ja lämpötilaa. Raitisilma Fan Coilille ohjautuu AHU:lta.

GHG = *Greenhouse Gas* eli kasvihuonekaasut

HVAC = *Heating, ventilation and air conditioning* eli lämmitys, ilmanvaihto ja ilmastointi

IMO = *International Maritime Organization*, kansainvälinen merenkulun järjestö

LNG = *Liquefied Natural Gas* eli nesteytetty maakaasu, joka on laivaliikenteessä käytettävää vähäpäästöisempää polttoainetta verrattuna aiempiin fossiilisiin polttoaineisiin

MEPC = *Marine Environment Protection Committee* eli merellisen ympäristön suojelukomitea

MGO/MDO = *Marine Gas/Diesel Oil*, laivaliikenteessä yleisesti käytettyjä polttoaineita

NO_x = *Nitrogen Oxides* eli typen oksidipäästöt

PM = *Particulate Matter* eli hiukkaspäästöt

SECA = *Sulfur Emission Control Areas* eli rikkioksidien rajoitusalueet Itämerellä, joissa polttoaineen rikkipitoisuus saa olla enintään 0,1 %

SFC = *Specific Fuel Consumption* eli spesifinen polttoaineenkulutus

SO_x = *Sulphur Oxides* eli rikin oksidipäästöt

VAV = *Variable Air Volume System* eli muuttuvilmavirtajärjestelmä, jossa ilmavaihtojärjestelmässä on huone- tai vyöhykekohtainen ilmavirran säätö. Säätö tapahtuu VAV-säätöpelleillä ja mekanismi perustuu puhaltimen automattiseen tasapainotilaan pyrkimiseen.

SANASTO

Bruttovetoisuus = (*eng. gross tonnage, [GT]*) yksikötön vertailuluku, joka käsittää koko laivan sisätilojen tilavuuden

Energiatehokkuus = hyötysuhde, joka käytetystä energiasta saadaan

Epäpuhtaus = hengitysilman ainesosa, jolla on terveydelle haitallisia vaikutuksia

Hiilineutraalius = hiilidioksidipäästöjen määrä on sama, kuin hiilinielujen sitoma hiilidioksidin määrä

Ilman laatu = epäpuhtauksien määrä sisäilmassa

Ilmanvaihto = sisäilman poistoa ja korvaamista ulkoilmalla sekä sisäilman epäpuhtauksien poistoa

Ottoteho = sähköteho, jonka laite ottaa sähköverkosta toimintansa aikana

Paineenkorotus = puhaltimen tuottama paine, jonka on ilmavirtaa tuottaakseen voitettava kanavistojen tuottamat kitkat, virtavastukset ja painehäviöt

Propulsiojärjestelmä = laivaa liikuttavaa työntövoimaa synnyttävä laitteisto

Puhaltimen staattinen hyötysuhde = puhaltimen energiatehokkuus, joka perustuu staattiseen paineeseen

Puhaltimen staattinen paine = pfs , puhaltimen paine- ja imuaukoilla olevien staattisten paineiden erotus

Tank-to-Wake = "tankista työntövoimaksi" eli polttoaineesta syntyvät päästöt laivan operoinnin aikana. Näissä päästöissä ei huomioida polttoaineen tuottamisen tai kuljettamisen synnyttämiä päästöjä.

Tonni = (*eng. metric ton, [mt]*) metrisen järjestelmän yksikkö massalle, tuhat kilogrammaa

1 JOHDANTO

Huoli ympäristöstä ja alati kasvavat energiatehokkuuden vaatimukset koskettavat myös merenkulkua ja risteilybisnestä ja täten luovatkin niin risteily-yhtiöille kuin alusvalmistajille, telakoille ja komponenttivalmistajillekin jatkuvaa painetta uusista innovaatioista, teknologioista ja toimintatapojen muutoksista. Maailman talouden kehittyessä merenkulun ennustetaan lisääntyvän entisestään, mikä merkitsee myös kasvavia päästöjä ja saasteita. Uusien järjestelmien ja menetelmien kehittämisen taustavoimana toimii lukuisat asetukset ja säädökset, joiden pohjalta myös useat risteily-yhtiöt, valmistajatahot ja telakat ovat laatineet omia strategioitaan ja hankkeitaan ympäristövaikutusten pienentämiseksi.

Merenkulku on yksi merkittävistä kasvihuonekaasujen päästölähteistä. Merkittävin saastuttaja merenkulussa on energiantuotto, joka on edelleen lähes täysin fossiilisten polttoaineiden varassa. Risteilyalusten energiantuottojärjestelmän ytimessä on monesta dieselmoottorista koostuva voimalaitos, joka tuottaa sähköä eri mekaanisten sovellutusten käyttöön – kuten muun muassa ilmanvaihtojärjestelmille. Ilmanvaihtojärjestelmät ovat merkittävä energiankuluttaja risteilyaluksilla, joten se on yksi potentiaalinen energiansäästökohde. Energiatehokkaat järjestelmät mahdollistavat säästöjä sähkönkulutuksen pienentymisen kautta polttoaineen kulutuksessa ja päästöjen synnyssä.

Tämän insinöörityön tarkoituksena on vertailla erityyppisten puhaltimien energiatehokkuutta osana ilmanvaihtolaitoksen kokonaisuutta ja tutkia miten puhallinvalinnan optimoinnilla voidaan vaikuttaa ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutukseen, päästöihin ja risteily-yhtiön talouteen. Työssä pyritään ymmärtämään puhaltimien merkitystä osana laivojen ilmanvaihtojärjestelmiä ja löytää mahdollisia tapoja energiatehokkaampaan operointiin puhallinoptimoinnin kautta. Työn tavoitteena oli luoda tutkielman pohjalta laskentatyökalu, jolla voidaan laskea ja arvioida puhallinsaneerauksen järkevyyttä. Opinnäytetyön tilaajana toimi Koja Oy.

2 SIDOSRYHMÄT

2.1 Koja Group & Koja Oy

Koja Group on vuonna 1935 Tampereella perustettu perheyrittäjä, joka työllistää yhteensä lähes 500 henkilöä globaalisti. Alkuvuosien metallipajatoiminnan jälkeen Koja erikoistui puhaltimiin sekä ilmanvaihtoon ja toimiikin nyt kolmella strategisella toimialalla: kiinteistöt, laivat ja teollisuusratkaisut. Tänä päivänä Koja Group-konsernin emoyhtiö Koja-Yhtiöt Oy:n alla toimii Koja Oy ja Chiller Oy tytäryhtiöineen sekä toiminnot niin Suomessa, Ruotsissa kuin Yhdysvalloissakin. Koja Groupin liikevaihto vuonna 2022 oli 119 miljoonaa euroa. (Koja julkaisuaika tuntematon.)

Koja Oy suunnittelee ja valmistaa ilmakäsittelyratkaisuja ja puhaltimia kiinteistöihin, laivoihin ja teollisuuteen. Koja Oy työllistää 350 henkilöä. Koja Oy:n liikevaihto vuonna 2022 oli 82 miljoonaa euroa. (Koja julkaisuaika tuntematon.)

Koja Groupin strategia

Koja Groupin tavoitteena on olla teknologia- ja ympäristöjohtaja sekä kotimainen suunnannäyttäjä puhtaamman ja terveellisemmän elinympäristön luomisessa. Jatkuva toiminnan ja tuotteiden kehitys on elintärkeää ilmasto- ja ympäristövaikutusten vähentämiseksi. Osana ympäristövastuuta on tuotteiden ja palveluiden elinkaarioptimointi sekä laadun ja turvallisuuden lisääminen. Kojassa panostetaan laitteiden ja järjestelmien käyttövarmuuteen, turvallisuuteen ja kestävytyteen. (Koja julkaisuaika tuntematon.)

2.2 Savonia-ammattikorkeakoulu

Savonia-ammattikorkeakoulu on yksi Suomen suurimmista ammattikorkeakouluista ja sen kampukset sijaitsevat Kuopiossa, Iisalmessa ja Varkaudessa. Savonia-ammattikorkeakoulussa opiskelee yli 8000 opiskelijaa. Kone- ja energiateollisuus on yksi Savonian vahvuusaloista, jonka saralla tehdään jatkuvasti kehitys- ja tutkimustyötä yritysten ja työyhteisöjen kehittämisen ja testaustarpeisiin sekä ympäristön ja yhteiskunnan hyväksi. (Savonia 2023.)

3 ENERGIATEHOKKUUSVAATIMUKSET RISTEILYALALLA

Risteilyalus on matkustaja-alus, jota käytetään vapaa-ajan matkustamiseen usein eri maiden, saarrien ja maanosien välillä. Risteilyalukset ovat monipuolisia ja kokonaisvaltaisia matkustajakokemuksia hytteineen, ravintoloineen, viihdekeskuksineen, ostospaikkoineen ja aktiviteetteineen.

Risteilyt ovat tänä päivänä merkittävä, nopeimmin suosiotaan kasvattava, kansainvälisen turismin muoto - vuonna 2022 risteilyillä kulki 20,4 miljoonaa matkustajaa. Kansainvälinen risteilymarkkina oli arvoltaan 7,67 miljardia dollaria vuonna 2022 sekä tuotti liikevaihtoa lähes 19 miljardia dollaria. Markkinan arvon odotetaan kasvavan 11,5 % vuosien 2023 ja 2030 välillä. (Statista 2023.)

Risteilymarkkinoiden kasvua kuitenkin hillitsee huoli ympäristön saastuttamisesta. Euroopan liikenne- ja ympäristöliiton (Transport & Environment 2019, 5 & 11–12) tuottaman tutkimuksen mukaan vuonna 2017 pelkästään Euroopan rannikoilla liikennöivät 203 risteilyalusta tuottivat noin 20-kertaisen määrän rikkioksidia kaikkiin Euroopan yli 260 miljoonaan henkilöautoon verrattuna. Vaikka vuoden 2020 alusta lähtien MARPOL-yleissopimuksen IV-liitteen päätöslauselma MEPC.320(74) sekä EU:n rikkidirektiivi määräävät risteilyalukset käyttämään enintään 0,5 % rikkipitoista polttoainetta SECA-alueiden ulkopuolella liikennöidessään, ovat risteilyalusten tuottamat päästöt silti merkittävän suuria henkilöautojen synnyttämään päästökuormaan verrattuna (Direktiivi 2016/802/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tietyjen nestemäisten polttoaineiden rikkipitoisuuden vähentämisestä, 6 artikla, Resolution MEPC.320(74), 5).

3.1 Hiilineutraaliustavoitteet

EU:n parlamentti hyväksyi vuonna 2021 ilmastolain, jonka tavoitteena on Euroopan ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. Ilmastolain taustavaikuttajina toimivat Pariisin ilmastopimus sekä parlamentin vuonna 2019 julistama ilmastohätätila. (Euroopan parlamentti 2021.)

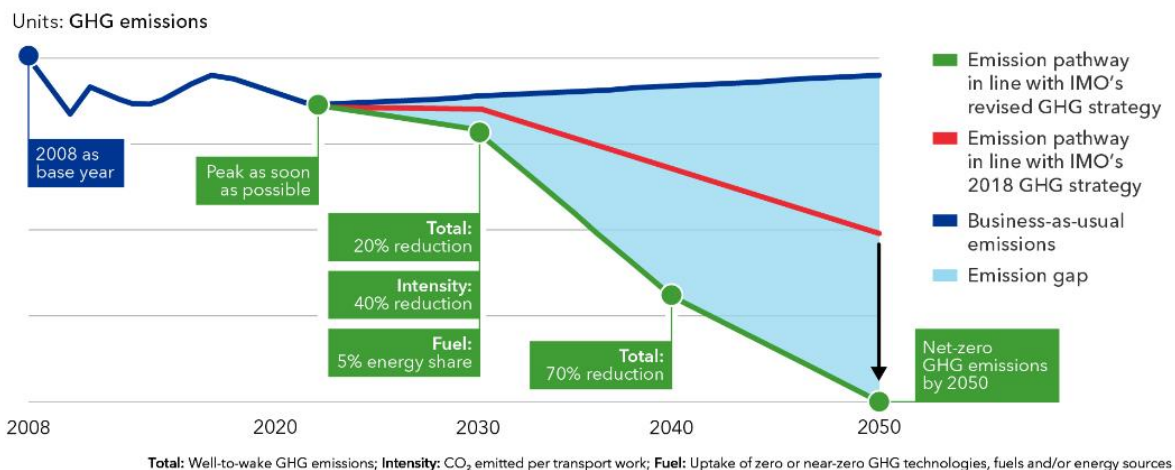
EU:n päästötavoitteet ovat poikineet tavoitteita päästöjen hillitsemiseksi myös merenkulkualalla. Risteily-yhtiöiden kansainvälinen yhdistys CLIA ja kansainvälisen merenkulun järjestö IMO sekä lukuisat risteily-yhtiöt ovat asettaneet tavoitteikseen tukea toimillaan EU:n päästötavoitteita ja pyrkivät myös nollatason nettopäästöihin samaan vuoteen, 2050 mennessä. Risteily-yhtiöt toimivat yhteistyössä alusvalmistajien sekä telakoiden kanssa investoidakseen hiilineutraaliustavoitteita tukeviin innovaatioihin. (CLIA 2023, 6–9, Resolution MEPC.377(80) 2023.)

Taulukko 1. Merenkulun synnyttämät päästöt vuosina 2012–2018 (IMO 2020, 2)

Table 1 – Total shipping and voyage-based and vessel-based international shipping CO₂ emissions 2012-2018 (million tonnes)

| Year | Global anthropogenic CO ₂ emissions | Total shipping CO ₂ | Total shipping as a percentage of global | Voyage-based International shipping CO ₂ | Voyage-based International shipping as a percentage of global | Vessel-based International shipping CO ₂ | Vessel-based International shipping as a percentage of global |
|------|--|--------------------------------|--|---|---|---|---|
| 2012 | 34,793 | 962 | 2.76% | 701 | 2.01% | 848 | 2.44% |
| 2013 | 34,959 | 957 | 2.74% | 684 | 1.96% | 837 | 2.39% |
| 2014 | 35,225 | 964 | 2.74% | 681 | 1.93% | 846 | 2.37% |
| 2015 | 35,239 | 991 | 2.81% | 700 | 1.99% | 859 | 2.44% |
| 2016 | 35,380 | 1,026 | 2.90% | 727 | 2.05% | 894 | 2.53% |
| 2017 | 35,810 | 1,064 | 2.97% | 746 | 2.08% | 929 | 2.59% |
| 2018 | 36,573 | 1,056 | 2.89% | 740 | 2.02% | 919 | 2.51% |

IMO kertoo neljännessä kasvihuonekaasututkimuksessaan (IMO 2020, 2–3) matkustusperusteisen kansainvälisen merenkulun kasvihuonepäästöjen kasvaneen vuodesta 2012 vuoteen 2018 mennessä 701 miljoonasta tonnista 740 miljoonaan tonniin – kyseessä on 5,6 % kasvu. Nämä matkustusristeilyjen synnyttämät päästöt käsittivät 2,02 % kaikista globaaleista kasvihuonepäästöistä vuonna 2018. (Taulukko 1.)



Kuva 1. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennysstrategian kaavio (DNV 2023)

IMO:n tutkimuksessa esitetyn arvon mukaan vuoden 2050 kasvihuonekaasujen päästötaso vuoden 2008 mitattuun tasoon nähden voisi olla 90–130 %, mikäli tarvittavia ja tehokkaita toimia päästöjen vähentämiseksi ei tehdä (IMO 2020, 2). Kuvassa 1 on havainnollistettu nykyisen päästötason, vuoden 2018 strategian sekä uusimman, portaittain etenevän, heinäkuussa 2023 asetetun strategian väliset erot.

IMO on viimeisimmässä strategiassaan (Resolution MEPC.377(80) 2023, 5) kirjannut kolme tavoitetta:

1. Lisätään panosta maailmanlaajuisissa toimissa kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Tavoitteen perustana toimii Pariisin sopimus ja YK:n kestävän kehityksen toimintaohjelma 2030.
2. Tunnistetaan kansainvälisen merenkulkualan toimet, tarkastellaan vaikutuksia ja tunnustetaan kansainvälisen merenkulun kriittiset tekijät kehityksen tukemisessa.
3. Yksilöidään toimia ja toimenpiteitä tavoitteiden saavuttamiseksi, mukaan lukien kannustimet tutkimus- ja kehitystyöhön kansainvälisen merenkulun kasvihuonepäästöjen seurantaan.

3.2 Ilmanvaihtojärjestelmien merkitys risteilyalusten energiankulutuksessa

Matkustaja-alusten sisäilmanvaihtojärjestelmät ovat propulsiojärjestelmän jälkeen laivojen toiseksi suurin energiankuluttaja ja koostaakin polttoaineesta tuotetusta sähköenergiasta noin kolmannek-

sen, kun taas kuljetusaluksilla vastaava kulutus on noin 10 %. Aluksen ollessa satamassa ilmavaihtojärjestelmä nousee suurimmaksi energiankuluttajaksi. (ABB julkaisuaika tuntematon, Shipwright julkaisuaika tuntematon.)

On siis selvää, että energiaa säästävällä ilmanvaihtoteknologialla voidaan vaikuttaa merkittävästi globaalilla tasolla päästöjä vähentäen. Laivojen energiantuottojärjestelmät ovat kuitenkin suuria ja monimutkaisia, ja niihin liittyy monia erilaisia prosesseja ja järjestelmänosia. Tämä tekeekin laivojen energiatehokkaasta ja ympäristöystävällisestä suunnittelusta ja toteutuksesta entistä haastavampaa. Näiden vihreän siirtymän ja kasvihuonepäästöjen vähentämisen tavoitteiden saavuttaminen vaatii siis valtavasti optimointia, teknologista kehitystä ja uusia innovaatioita myös ilmanvaihtojärjestelmien osalta.

Uusien laivojen osalta teknologinen kehitys ja päästöjä vähentävät toimet ovat yksinkertaisempia. Uusissa laivoissa jatkuvasti otetaan uutta ympäristöystävällisempää ja energiatehokkaampaa teknologiaa jo käyttöön. Tällaisista teknologioista esimerkkeinä muun muassa LNG-polttoaineella toimivat moottorit, EGCS eli pakokaasujen puhdistusjärjestelmä sekä kytkentävalmius maasähköjärjestelmään (CLIA 2023, 14–15 & 18–19).

Uusien laivojen ohella on kuitenkin tärkeää paneutua myös vanhojen laivojen saneeraukseen. Matkustajalaivojen keskimääräinen suunniteltu käyttöikä on yli 30 vuotta ja nyt käytössä olevan laivaston keski-ikä on 14,1 vuotta, joten hiilineutraalius- ja päästötavoitteiden saavuttaminen vaatii myös modernisointitoimia vanhemmissa laivoissa. (CLIA 2023, 23). Erityisesti matkustajalaivoissa ilmanvaihdon ollessa valtava energiankuluttaja, on siihen syytä kehittää uusia energiaa säästäviä ratkaisuja.

Erik Schobesbergerin (Cruise HVAC: antiviral and energy efficiency innovations revealed 2022, 32–34) mukaan uusien laivojen energiatehokkuus on parantunut yli 50-prosenttisesti viimeisen 20 vuoden aikana. Kuitenkin kaksi kolmasosaa laivoista on yli 10-vuotiasta kalustoa, joiden modernisoinnin ja energiatehokkuuden parantaminen on erityisen tärkeää. Merkittävä aspekti modernisoinnista keskustellessa on saneerauskustannukset. Jälkiasenteiset järjestelmät monesti vaativat usein laajojakin mekaanisia muutoksia, mikä nostaa kustannukset kohtuuttomiksi.

4 AJOPROFIILI

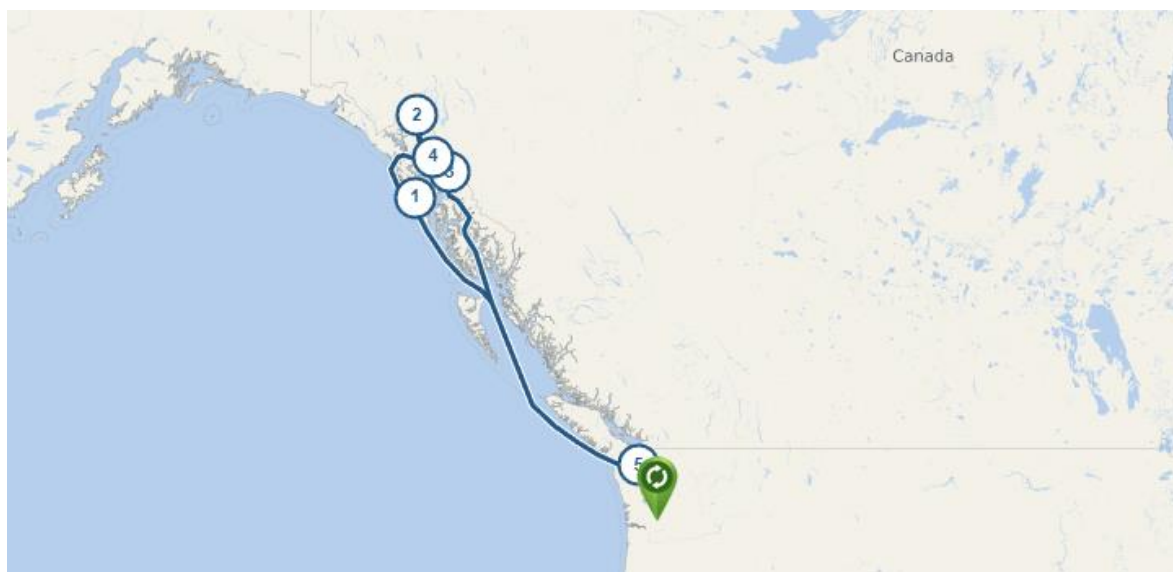
4.1 Quantum Of The Seas

Royal Caribbean Groupin omistama ja Royal Caribbean Internationalin operoima, vuonna 2015 parhaaksi uudeksi risteilijäksikin valittu, Quantum Of The Seas on Saksan Papenburgin telakalta vuonna 2014 merille laskettu, aikansa kolmanneksi suurin risteilyalus. Quantum Of The Seas on Royal Caribbeanin kuusi alusta käsittävän Quantum-luokan johtava alus. Tällä 16 kantta käsittävällä aluksella on pituutta 348 metriä ja leveyttä 41 metriä. Aluksella on 168 666 bruttovetoisuus ja se voi kuljettaa enimmillään 4905 matkustajaa ja 1500 henkilöstön jäsentä kerralla. (DNV julkaisuaika tuntematon, Royal Caribbean International Press Center julkaisuaika tuntematon.)

4.2 Ajoprofiili

Laivojen energiankulutus riippuu suuresti laivan operoinnista, joka taas riippuu laivan ja sillä tehtyjen ajojen tyypistä. Tässä työssä esimerkkinä toimii yllä esitelty Quantum Of The Seas-risteilyalus, jolle luotiin ajoprofiili vuoden 2024 suunniteltujen ajojen pohjalta. Ajoprofiilin on tarkoituksena toimia vain esimerkkinä ja tarjota pohja-arvoja laskentatyökälulle.

Risteilyaluksella järjestetään vuonna 2024 eri pituisia risteilyjä Tyynellämerellä. Matkustajaristeilyjä vuoden aikana kertyy 328 päivän ajalta. Tämän lisäksi risteilyalus ajaa siirtoajoja, joilla matkustajia ei ole mukana. (CruiseMapper 2024.)



Kuva 2. Quantum Of The Seas 'Alaska Adventure Cruise'-reitti (CruiseMapper 2024)

Esimerkkinä viikkotason ajoprofiilille toimii Quantum Of The Seas'n seitsemän päivää kestävä Alaska Adventure Cruise (Kuva 2.), jonka lähtö- ja paluusatama on Seattlessa, Washingtonissa. Lähdön ja paluun ohella alus pysähtyy risteilyn aikana viiteen satamaan Alaskassa ja Kanadassa (Taulukko 2.).

Taulukko 2. Quantum Of The Seas 'Alaska Adventure Cruise'-aikataulu

| Operational Profile | | Quantum Of The Seas |
|---------------------|-------------|--------------------------------------|
| Date | Time | Port |
| 20 May | 16:00 | Departure: Seattle, Washington |
| 22 May | 09:30-17:00 | Sitka, Baranof Island Alaska |
| 23 May | 07:00-17:00 | Skagway, Alaska |
| 24 May | 05:00-10:00 | Tracy Arm Fjord, Alaska |
| 24 May | 13:00-20:00 | Juneau, Alaska |
| 26 May | 17:00-22:00 | Victoria BC, Vancouver Island Canada |
| 27 May | 6:00 | Arrival: Seattle, Washington |

4.3 Polttoaineen kulutus

Erään arvion mukaan (University of Colorado Boulder 2016) suuret risteilyalukset kuluttavat jopa 250 tonnia polttoainetta päivässä. Tämän päiväkulutuksen mukaan Quantum Of The Seas'n vuosittainen polttoaineenkulutus olisi keskimäärin noin 82 000 tonnia. Tähän arvioon on otettu huomioon ainoastaan laskennalliset 328 risteilypäivää eikä siihen ole lisätty arvioita siirtoajojen tuottamasta polttoaineen kulutuksesta. Tähän yksi syy on se, ettei tyhjällä siirtoajolla ilmastointijärjestelmät ole-tettavasti toimi samalla tavalla kuin risteilyajojen aikana. Toisekseen raja-
aus ainoastaan risteilypäiviin yksinkertaistaa laskutapoja ja antaa mahdollisuuden hyödyntää laskentatyökalua operointikustan-
nusten arvioinnissa myös risteilyille, jotka toimivat ilman pitkiä siirtoajoja.

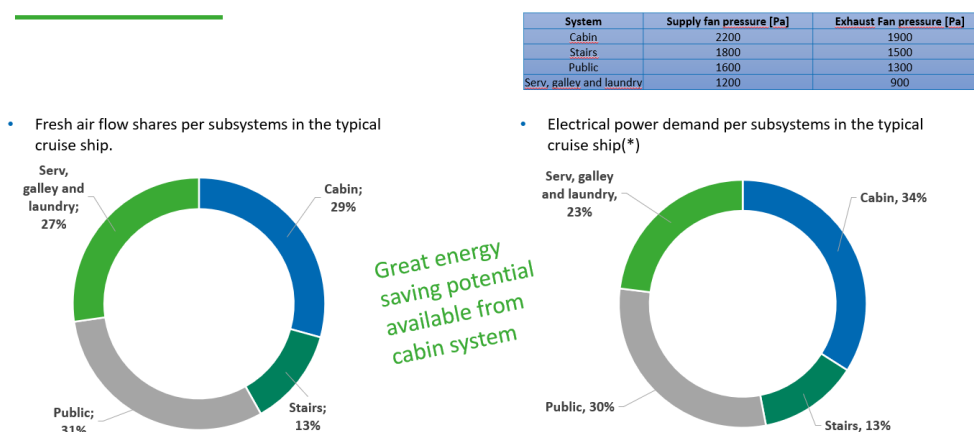
5 ILMANVAIHTO RISTEILYALUKSILLA

Ilmanvaihdon toimivuus risteilyaluksilla on erityisen tärkeä osatekijä niin henkilöstön kuin matkustajienkin matkustusmukavuudessa. Raitis ilma ja lämpötilojen hallinta edistää henkilöstön mukavuutta, terveyttä, tuottavuutta ja työturvallisuutta sekä edesauttaa järjestelmien ja laitteiden toimivuutta laivalla. Laivojen ilmanvaihdon vaatimuksia määrittelee ISO 7547-standardi, jossa määritellään muun muassa raittiin ilman vähimmäismäärät, sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvot. (SFS-EN ISO 7547:2002, Gelair 2023)

5.1 Toiminta-alueet

Laivojen ilmastointijärjestelmä voidaan jakaa karkeasti neljään toiminta-alueeseen: julkisiin tiloihin, toimitiloihin, portaakkoihin ja hytteihin. Jokaisella alueella ja tilalla on ilmanvaihdon suhteen erilaiset vaatimukset ja toimintaperiaatteet tehokkaan ilmanvaihdon toteuttamiseksi.

AIR CONDITIONING SUB-SYSTEM'S ENERGY CONSUMPTION SHARES



* Fan coils are excluded and all AHU's running with dimensional speed.

KOJA

Kuva 3. Ilmanvaihtojärjestelmän alueiden jakautuminen (Tanninen 2023)

Kuvan 3 diagrammeista nähdään, miten ilmanvaihtojärjestelmän raitisilman määrän ja sähkönkulutuksen jakautuminen tapahtuu näiden neljän toiminta-alueen kesken. Diagrammi osoittaa, että suurin säästöpotentiaali jakautuu melko tasaisesti julkisten tilojen, toimitilojen ja hyttien ilmanvaihtojärjestelmien kesken.

5.1.1 Hytit

Hyttijärjestelmä palvelee muun muassa hyttejä, käytäviä, sairaala-alueita, ohjaushyttiä ja majoitustilojen pienempiä huoneita. Järjestelmä palvelee siis pienempiä tiloja, joilla on jatkuva raitisilman tarve.

Järjestelmän AHU-ilmankäsittely-yksiköt ottavat ulkoa raittiin ilmaa ja ohjaavat sitä erillisiin Fan Coil-ilmanvaihtokoneisiin. Ilmanvaihtojärjestelmässä jokaisella hytillä on oma pienempi Fan Coil-ilmanvaihtokoneensa, joka tuo hyttiin raittiin ilmaa sekä ohjaa poistoilman erillisen poistokanaviston

kautta AHU-laitteen läpi ulos. AHU-laitteilta tuleva ilma lämmitetään tai jäähdytetään Fan Coil-ilmanvaihtokoneiden itsenäisillä pattereilla.

Hyttijärjestelmässä on käytössä avainkorttijärjestelmä, jolla Fan Coil-laitteiden käyttökapasiteettia ohjataan. Tällöin asiakkaan avainkortin ollessa hytissä sijaitsevassa ohjauslaitteessa, toimii ilmanvaihto standardiasetuksella. Kun avainkortti poistetaan ohjauslaitteestaan hytistä poistuttaessa, laskee ilmanvaihtokoneen tuoma ilmamäärä hieman jälkijättöisesti pienemmäksi.

Hytissä tuloilmavirtaus on poistoilmavirtausta hieman suurempi, jotta hytti on hieman ylipaineistettuna. Tästä poikkeaa julkiset saniteettitilat ja sairaala-alue, joissa sisäilmaa ei kierrätetä lainkaan, vaan ilmanvaihto toimii sataprosenttisesti raittiilla ilmalla ja päinvastoin alipaineistettuna, jotta hajut ja ilman epäpuhtaudet eivät kulkeudu viereisiin tiloihin (SFS-EN ISO 7574:2002, 9).

5.1.2 Julkiset tilat

Julkisten tilojen ilmanvaihto toimii samalla periaatteella kuin hyteissä, mutta yksittäiset palveltavat alueet ovat kooltaan suurempia. Julkiset tilat on jaettu lohkoihin, joita palvelevat omat Fan Coil-ilmanvaihtokoneensa, jotka ottavat raittiin ilman ilmanvaihtohuoneessa sijaitsevalta AHU-yksiköltä.

Julkisten tilojen ilmanvaihtojärjestelmä on varusteltu hiilidioksidi- ja lämpötilamittareilla sekä muutuvilmajärjestelmällä eli VAV-säätöpelleillä, joiden avulla raitisilmamäärää voidaan säätää yksilöllisesti alueittain. Ohjattavan alueen ilman lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta mitataan, minkä perusteella raitisilman määrää voidaan ohjata tarpeen mukaan joko pienemmäksi tai suuremmaksi. Tämä järjestelmä säästää energiaa hetkinä, kun julkisten tilojen käyttö on vähäisempää, esimerkiksi öisin ja laivan ollessa satamassa.

5.1.3 Toimitilat

Toimitilojen ilmanvaihtojärjestelmän Service AHU-yksiköt palvelevat muun muassa ravintoloiden keittiöitä ja pesulatilaja. Toimitilajärjestelmä palvelee siis sellaisia toiminta-alueita, joissa tuloilma käsitellään ja poistoilmassa on epäpuhtauksia. Myös toimitilajärjestelmässä osassa tiloissa tulee olla alipaine, jotta ilman hajut ja epäpuhtaudet eivät kulkeudu muihin tiloihin.

Jokainen yksikkönsä on säädettävissä yksilöllisesti eri toimitilojen tarpeisiin. Esimerkiksi keittiön ilmanvaihtolaitteita hallinnoidaan omalla tarpeenmukaisella DBV-monitorointijärjestelmällään. Tällöin keittiön laitteiden ollessa kiinni myös ilmanvaihto on pois päältä. Myös ilman lämpötilasäätely on joko yksilöllisellä toimitilalla yksilöllinen ja tarveperustainen.

5.1.4 Portaikot

Portaikkojen ilmanvaihto ohjautuu täysin omilla AHU-yksiköillään. Samoihin paloalueisiin kuuluu joidakin julkisia WC-tiloja sekä hissiauloja. Portaikkojen ilmanvaihto on vakio-ohjattu tuomaan 40 % raitisilmaa ja kierrättämään 60 % sisäilmasta. Koska 60 % poistoilmasta kierrätetään, jäähdytyksen tulee olla jatkuvasti käytössä. Lämpötilaa mittaa lukuisat, eri kansilla sijaitsevat, seinäasenteiset lämpötila-anturit.

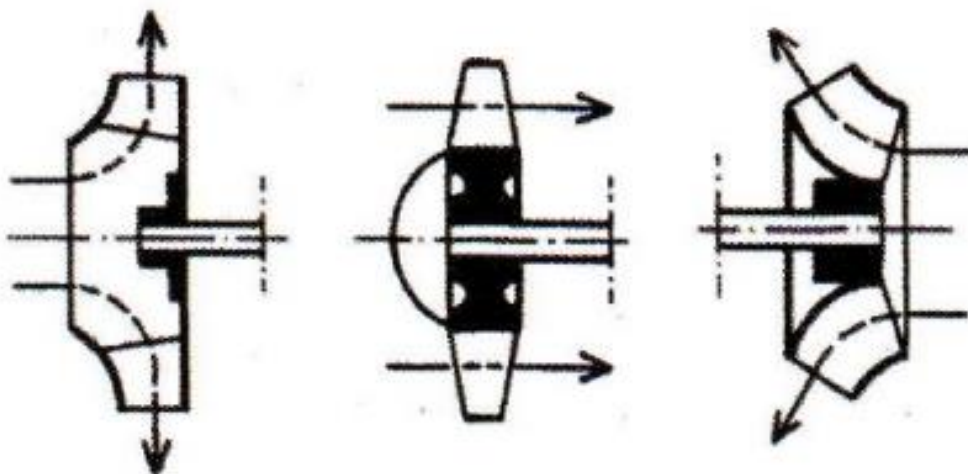
6 PUHALTIMET

Puhallin on ilmanvaihtolaitteen yksi ratkaisevin osa, jonka avulla ilma saadaan liikkumaan kanavistoissa ja kohdetiloissa. Puhaltimen toimintaperiaate perustuu siipipyörän siipien tuottamaan ilmavirtaan ja paineeseen. Puhaltimen ilmavirtaa voidaan kasvattaa lisäämällä siipipyörän pyörimisnopeutta, joka hihnakäyttöisissä puhaltimissa tapahtuu välityssuhteen muutoksilla ja suorakäyttöisissä taajuusmuuntajalla. Puhaltimen tuottama ilmavirta synnyttää kanavistossa painehäviötä, joka vastaa puhaltimen luomaa paineenkorotusta. Puhallin siis pyrkii automaattisesti tasapainotilaan kanaviston kanssa. (Sandberg 2016b, 174–176.)

Erilaisiin ympäristöihin ja tarkoituksiin sopivat erilaiset puhaltimet, joten oikealla puhallinvalinnalla voidaankin optimoida ilmanvaihtolaitteen ja järjestelmän toimivuus ja tehokkuus.

Puhaltimet voidaan jakaa siipipyörän muotoilun ja ilmansuuntauksen perusteella kolmeen kategoriaan:

1. Keskipakoispuhaltimet eli radiaalipuhaltimet
2. Aksiaalipuhaltimet
3. Puoliakksiaalipuhaltimet eli sekavirtauspuhaltimet



Kuva 4. Puhallintyypit: keskipakois-, aksiaali- ja puoliakksiaalipuhallin (Sandberg 2016a, 148)

Keskipakois- eli radiaalipuhaltimessa (kuvassa 4 vasemmalla) ilma virtaa puhaltimelle akselin suuntaisesti, mutta poistuu puhaltimen lavoilta radiaaliksi, suorassa kulmassa.

Aksiaalipuhaltimessa (kuvassa 4 keskellä) ilma virtaa puhaltimelle ja puhaltimelta pois akselin suuntaisesti.

Puoliakksiaali- eli sekavirtauspuhaltimessa (kuvassa 4 oikealla) ilmavirta kulkee ikään kuin radiaali- ja aksiaalipuhaltimien välimuotona. Ilma kulkee puhaltimelle radiaaliksi, mutta kulkeutuu puhaltimelta pois etuviistoon.

Puhallintyyppit voidaan edellä mainitun jaottelun lisäksi jakaa kaavuttomiin kammiopuhaltimiin sekä kaavullisiin puhaltimiin. Kaavullisen puhaltimen paineenkorotuskyky on kammiopuhallinta parempi, sillä puhaltimen kaapu toimii niin ikään diffuusorina muuttaen ilmavirran nopeuden energiaa staattiseksi paineeksi. (Sandberg 2016b, 174–176.)

Kaavulliset radiaalipuhaltimet ovat aiemmin olleet ilmapuhaltimissa yleisimmin käytetty puhallintyyppi ennen kammiopuhaltimien yleistymistä (Strandberg 2016b, 176). Kaavullisten radiaalipuhaltimien päästessä parempiin paineenkorotuksiin olennaisena kysymyksenä onkin, riittääkö uusissa energiatehokkaissa kammiopuhaltimissa paineenkorotuskyky etenkin silloin, kun tarvitaan suuria ilmamääriä. Asentamalla kammiopuhaltimia rinnan useamman puhaltimen puhallinseinäksi saadaan kasvatettua ilmavirtaa.

6.1 Vanhat puhaltimet

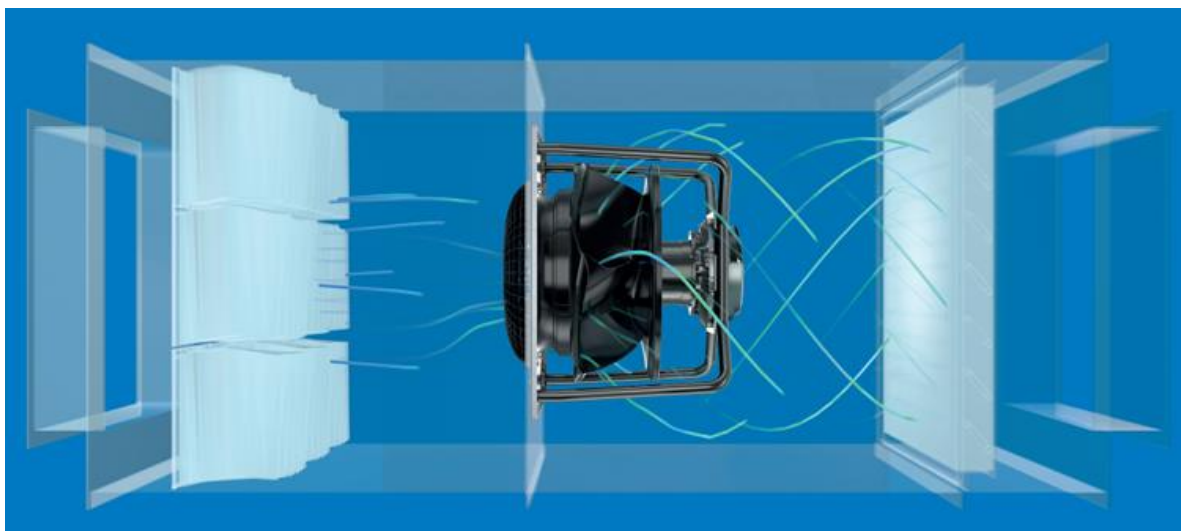
Tarkasteluun otetussa aluksessa olemassa olevat puhaltimet ovat FläktWoodsin suorakäyttöisiä GXHB-keskipakoispuhaltimia (Kuva 5.), jotka ovat nykyisellään jo poistuneet FläktWoodsin tarjoamasta puhallinvalikoimasta. GXHB-puhaltimissa on taaksepäin kaareutuvat, epoksimaalatut terässivut sekä puhaltimet ovat vahvistettuja korkeampia nopeuksia varten. Nämä puhaltimet ovat molemmiin puoliin imeviä, kaavullisia puhaltimia. Puhaltimilla päästään valmistajan mukaan jopa 35 m³/s ilmavirtauksiin ja 3 300 pascalin paineenkorotuksiin. (FläktWoods julkaisuaika tuntematon.)



Kuva 5. FläktWoods GXHB-puhallin (FläktWoods julkaisuaika tuntematon)

6.2 Uudet puhaltimet

Puhallinvertailun uusiksi puhaltimiksi valikoitui ebm-papstin uusimmat sekavirtaustekniikkaa hyödyntävät RadiPac-puhaltimet, joissa on täysin uudelleen muotoillut lasikuituvahvisteiset komposiittisiipi-pyörät. Siipiipyörän peitelevyn aaltomainen muotoilu optimoi ilmavirtauksen (Kuva 6.) ja kolmiulotteisesti kierretyt, vahvat komposiittisiivet minimoivat virtaushäviöitä ja mahdollistavat korkeat pyörimisnopeudet. RadiPac-puhaltimilla päästään valmistajan mukaan 20 000 m³/h ilmavirtauksiin ja yli 2000 pascalin paineenkorotuksiin. (ebm-papst 2022)



Kuva 6. ebm-papst RadiPac-puhallin (ebm-papst 2022)

Uusilla ebm-papstin RadiPac-puhaltimilla tavoitellaan pienempää sähkönkulutusta sellaisissa ilmanvaihtolaitteissa, joiden palvelemien kohdetilojen paineenkorotus- ja ilmamäärätavoitteet ja -vaatimukset ovat saavutettavissa.

7 PUHALLINVERTAILU

Puhallinvertailussa verrattiin sekä puhaltimien sähkönkulutuksia että hyötysuhteita erinäisissä toimintapisteissä toisiinsa. Puhaltimen hyötysuhde kertoo puhaltimelle tuodun tehon ja käyttötarkoitukseen saadun tehon suhteen (Sandberg, 2016b, 382). Tässä tapauksessa puhallinvertailussa tutkittiin staattisia hyötysuhteita, eli puhaltimen energiatehokkuutta, joka perustuu staattisen paineen mittaamiseen.

Puhaltimen staattinen hyötysuhde lasketaan seuraavasti:

$$n_{es} = \frac{q_v * p_{fs}}{P_{ed}} = \text{staattinen hyötysuhde} \quad (1)$$

missä

$$q_v = \text{ilmamäärä (m}^3/\text{s)}$$

$$p_{fs} = \text{staattinen paine (Pa)}$$

$$P_{ed} = \text{ottoteho (kW)}.$$

7.1 Menetelmät

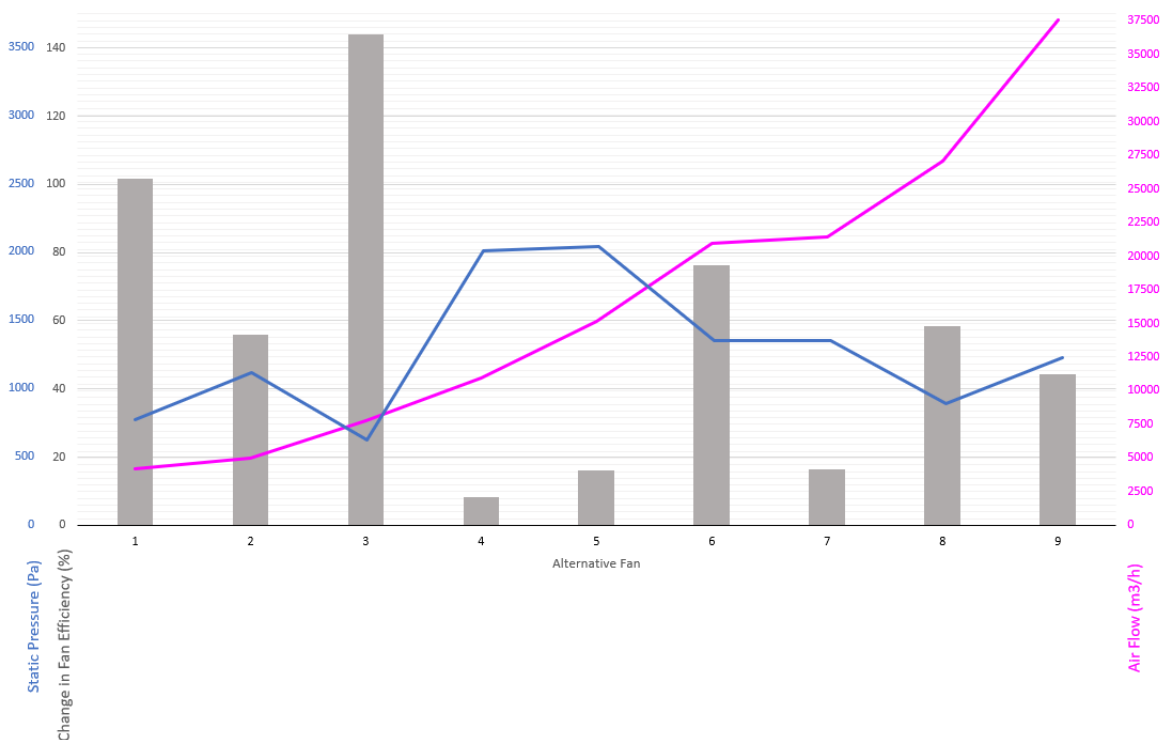
Puhallinvertailun pohjatietoina käytettiin vanhojen puhaltimien osalta käyttöönottodokumentteja sekä mittaustuloksia ja uusien puhaltimien osalta käytettiin emb-papstin omaa FanScout-puhallinmitoitusohjelmaa. Kaikkiaan vertailtavia puhallinmalleja oli yhdeksää erilaista.

Puhallinvertailua varten koottiin puhaltimista vertailulista käyttöönottodokumenttien pohjalta. Vertailussa valittiin jokaisesta puhallinkoosta yksi käyttöönottotestattu puhallin, jonka toimintapisteen perusteella FanScout-mitoitusohjelmalla haarukoitiin tilalle sopivia kammiopuhaltimia uuden RadiPac-malliston joukosta. Tavoitteena oli samalla selvittää puhaltimien ominaisuuksia ja sellaiset puhallinmallit, joita voisi käyttää mahdollisimman monipuolisesti.

7.2 Puhallinvertailun tulokset

Puhallinvertailun tuloksena huomattiin uusien sekavirtauspuhaltimien voittavan aiemmin käytössä olleiden keskipakoispuhaltimien hyötysuhteet jokaisella toiminta-alueella.

Hyttijärjestelmässä yleisesti vaaditaan yli 2000 pascalin paineenkorotuskykyä, ja tuloksista laaditusta kaaviosta (Kuva 7.) nähdäänkin tällöin selvä notkahdus hyötysuhteiden kehityksessä vertailtavien puhaltimien 4 ja 5 osalta. Kaaviossa puhallinhyötysuhteen muutokset prosentteina on esitetty harmailla pylväillä, staattiset paineet pascaleina sinisellä käyrällä sekä ilmamäärät kuutioina tunnissa pinkillä käyrällä.



Kuva 7. Puhallinhyötysuhteiden muutokset suhteessa ilmamäärään ja staattiseen paineeseen Julkisten tilojen ja toimitilojen puhaltimien kohdalla keskipakoispuhaltimien päivittäminen uusiin sekavirtauspuhalmiin tuottaa merkittäviä (> 40 %) parannuksia hyötysuhteissa ja tämän myötä myös säästöjä energiankulutuksessa. Tämä johtuu palveltavien tilojen huomattavan paljon pienemmästä paineenkorotustarpeesta. Peukalosääntönä tämän perusteella voitaisiin sanoa, että parempiin tuloksiin kammio puhaltimilla päästään paineenkorotustarpeen ollessa alle 2000 pascalia.

Tämän lisäksi tuloksista pystyttiin puhaltimien 4–8 kohdalla tekemään huomio, että ilmavirran kasvaessa yli 10 000 m³/h tulisi tilalle asentaa kahden puhaltimen puhallinseinä. Tässä esimerkissä käytetyillä puhaltimilla ja toimintapisteillä ainoastaan viimeinen puhallinvertailu vaati kolmen puhaltimen puhallinseinän, kun ilmamäärä nousi reilusti yli 30 000 m³/h. Useamman puhaltimen puhallinseinä toki lisää saneerauskustannuksia, mutta ne on kuitenkin mahdollista paikata energiansäästön tuomilla hyödyillä. Puhallinvertailussa saatujen energiansäästöjen vaihteluväli oli 8–144 % välillä.

7.3 Excel-laskentatyökalu

Puhallinvertailun tuottamien pohjatietojen perusteella luotiin laskentatyökalu, jonka tarkoituksena on toimia tämän laskentaesimerkin lisäksi helposti käytettävänä ja mukautettavana laskurina myös muiden laivojen ja risteily-yhtiöiden puhallinsaneerauksien taloudellista järkevyyttä arvioidessa.

Laskurin pohjatiedoiksi laivan yksilöintiä varten tarvittiin muun muassa seuraavia tietoja:

- arvio polttoaineen vuosittaisesta kulutuksesta
- polttoaineen hinta
- puhaltimien ilmavirta, staattinen paine ja sähkönotto per mittauspiste
- puhallinkohtaiset jälleenmyyntihinnat
- hinta-arvio puhallinkohtaiselle vaihto- ja asennustyölle
- SFC sekä päästöjen kertoimet

Laskurista saatiin tietoon:

- puhaltimien hyötysuhteiden muutokset prosentteina ja prosenttiyksikköinä
- puhaltimien väliset erot sähkönkulutuksessa
- hyötysuhteiden ja sähkönkulutusten muutokset
- säästöt sähkönkulutuksessa vuositasolla
- polttoaineen säästöt vuositasolla
 - o polttoainetonneina
 - o prosentuaalisena säästönä
 - o dollareina
 - o euroina
- puhallinsaneerauksen takaisinmaksuaika
- saneerauksella saavutetut säästöt kasvihuonepäästöissä

8 PUHALLINSANEERAUKSEN VAIKUTUKSET

8.1 Lähtötiedot

Puhallinsaneerauksen tuomia taloudellisia säästöjä arvioidessa tarvitaan ensimmäiseksi polttoaineen hinta. Yhden polttoainetonnin hinta lasketaan Royal Caribbeanin (2023) ilmoittamien vuoden 2023 polttoaineen kokonaiskustannuksien ja -kulutuksen perusteella seuraavasti

$$\begin{aligned} \text{Polttoainetonnin hinta} \left[\frac{\$}{mt} \right] &= \frac{\text{Koko yhtiön polttoaineiden kokonaiskustannukset} [\$]}{\text{Koko yhtiön polttoaineiden kokonaiskulutus} [mt]} & (2) \\ &= \frac{1\,150\,M\$}{1\,636\,000\,mt} \\ &\approx 703 \frac{\$}{mt} \end{aligned}$$

Vuosittaisen polttoaineen kulutukseksi saatiin aiemmin kappaleessa 4.3 mainittu 82 000 tonnia, joten 703 dollarin tonnihinnalla risteilyaluksen risteilyajoihin tarvittavan polttoaineen kustannuksiksi saadaan

$$\begin{aligned} \text{Risteilijän vuosittaiset polttoainekustannukset} [\$] & & (3) \\ &= \text{polttoainetonnin hinta} \left[\frac{\$}{mt} \right] * \text{polttoaineen kulutus} [mt] \\ &= 703 \frac{\$}{mt} * 82\,000\,mt \\ &= 60\,458\,000\ \$ \end{aligned}$$

8.2 Taloudelliset säästöt

Puhallinvertailusta saadut energiansäästöjen tulokset tulee kertoa tarvittavien puhaltimien määrillä. Koko alukseen tarvittavien ilmanvaihtolaitteiden ja niiden sisältämien puhaltimien määrät selviävät yrityksen sisäisistä käyttöönottodokumenteista ja suoritettuna puhallinvertailun tuloksista.

Näiden laskutoimitusten pohjalta saatiin saavutetut energiansäästöt tunneittain ja vuosittain:

$$\text{Saavutettu energiansäästö tunneittain} = 540,85 \frac{kW}{h} \quad (4)$$

$$\text{Saavutettu energiansäästö vuosittain} = 4\,257\,560,89 \frac{kWh}{a} \quad (5)$$

Jotta voidaan laskea säästöt polttoaineena ja tämän myötä rahassa, tarvitaan tietoon SFC, joka kertoo polttoaineenkulutuksen suhteessa tuotettuun sähköenergiaan. SFC-arvo määräytyy risteilijän moottorin ja käytettävän polttoaineen mukaan. Tässä tapauksessa SFC-arvon määrittää nelitahtinen keskinopea dieselmoottori ja MDO tai MGO-polttoaine (DNV julkaisuaika tuntematon, Sphera 2021, 29).

$$SFC = 183,7 \frac{g}{kWh} \quad (6)$$

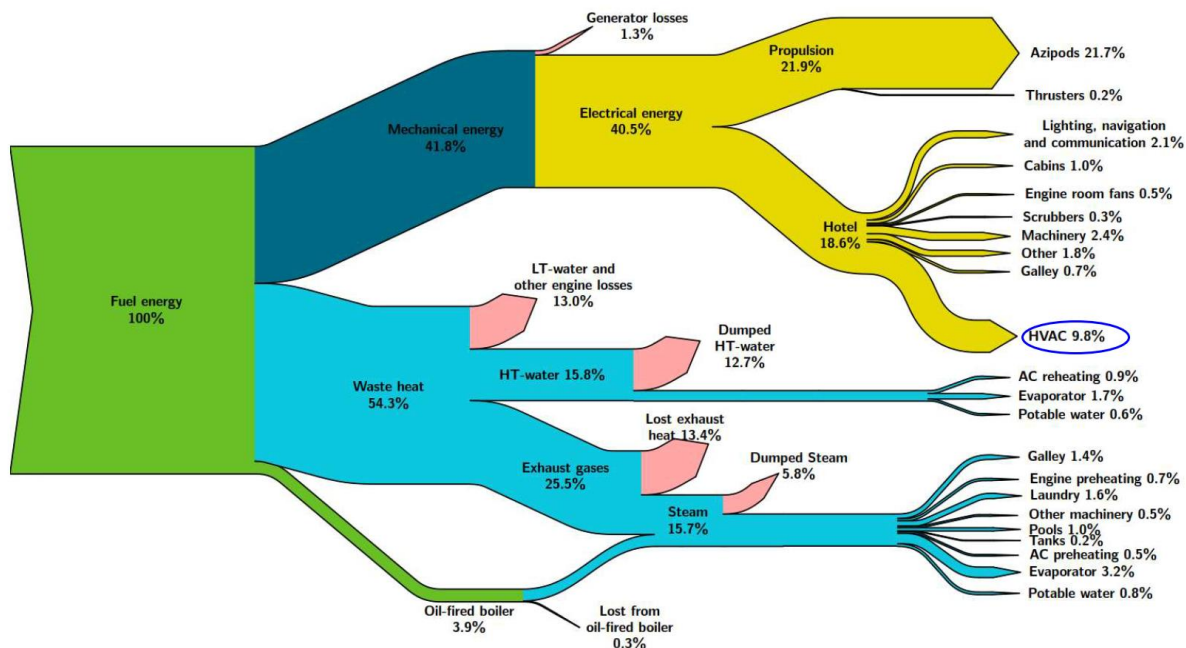
Vuosittain säästetyn polttoaineen määrä tonneina saadaan laskettua seuraavasti

$$\begin{aligned} \text{Säästetty polttoaine vuosittain [mt]} &= \text{Energiansäästö vuosittain} \left[\frac{kWh}{a} \right] * SFC \left[\frac{g}{kWh} \right] * 10^{-6} \quad (7) \\ &= 4\,257\,560,89 \frac{kWh}{a} * 180,4 \frac{g}{kWh} * 10^{-6} \\ &\approx 782,11 \text{ mt} \end{aligned}$$

Lopulta tämän myötä puhallinsaneerauksen tuottamien vuosittaisten taloudellisten säästöjen määrä saadaan laskettua seuraavasti

$$\begin{aligned} \text{Vuosittainen säästö [\$]} &= \text{Säästetty polttoaine [mt]} * \text{Polttoaineen hinta} \left[\frac{\$}{mt} \right] \quad (8) \\ &= 782,11 \text{ mt} * 703 \frac{\$}{mt} \\ &= 549\,826,10 \$ \end{aligned}$$

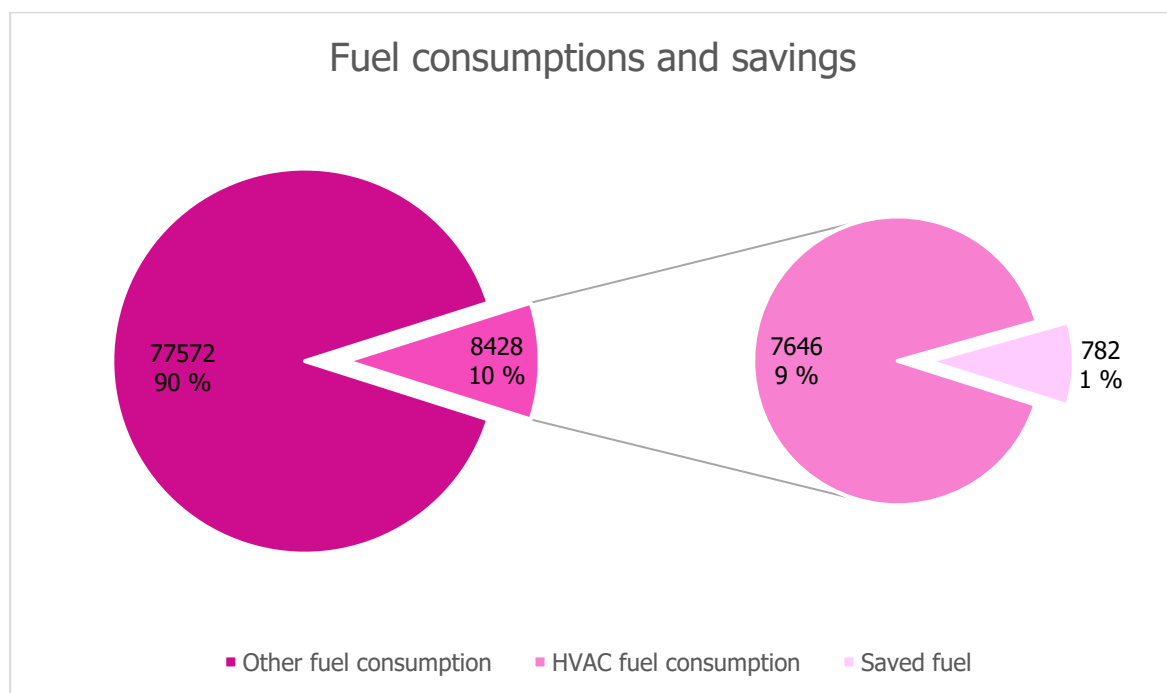
Mikäli verrataan laskelmien mukaan saavutettuja polttoaineen säästöjä aiemmin saatuun 82 000 tonnin kokonaispolttoaineenkulutukseen, vastaavat säästöt tällöin 0,91 % kokonaiskulutuksesta (Kuva 9.).



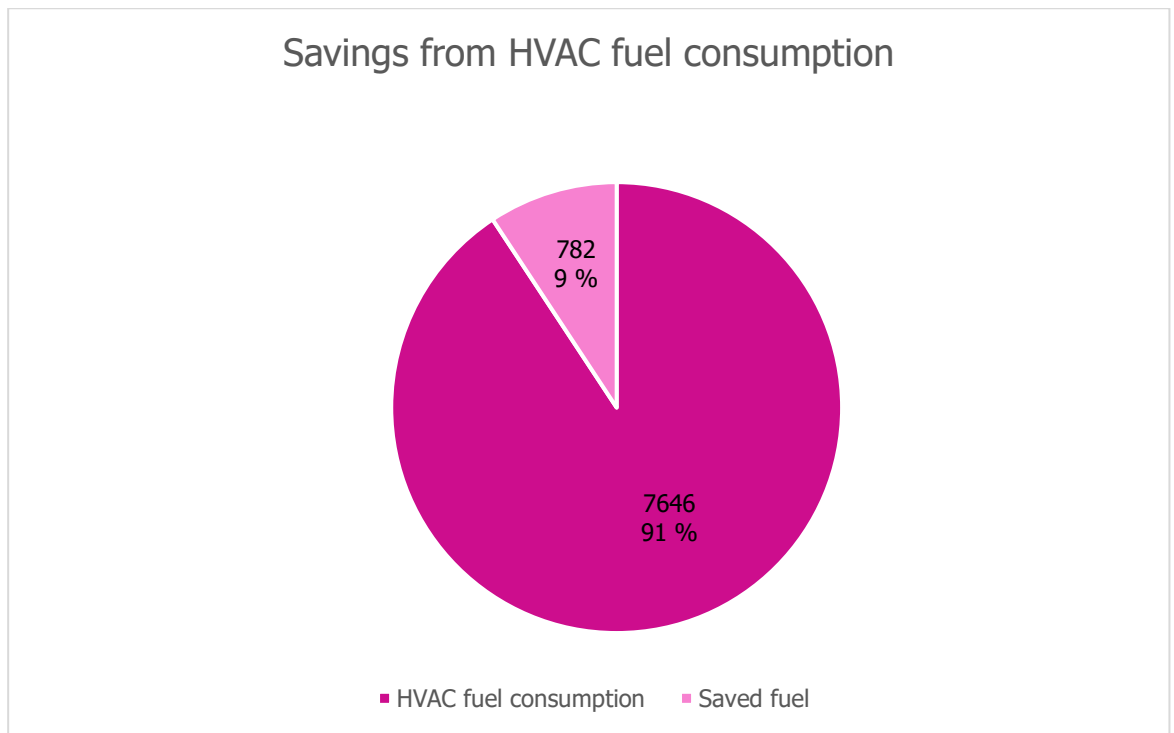
Kuva 8. Risteilyaluksen polttoaineen jakautuminen eri sovellutuksiin (Tanninen 2023)

Lisäksi haluttiin saada selville energiansäästön osuus ilmanvaihtojärjestelmän kokonaiskulutuksesta. Ilmanvaihtojärjestelmän energiankulutus on kuitenkin hieman haastavaa mitoittaa kovin tarkkaan. Arvion mukaan (Tanninen 2023) ilmanvaihdon osuus koko laivan polttoainekulutuksesta on noin 9,8 % (Kuva 8.), jolloin se tarkoittaisi säästettävän 728 polttoainetonnin vastaavan ilmanvaihdon kuluttamasta polttoaineesta jopa 9,28 %.

Kuvien 9 ja 10 diagrammeissa ilmenee ilmanvaihtojärjestelmän (~10 %) ja säästön (~1 %) osuus kokonaispolttoainekulutuksesta kuin myös säästön osuus ilmanvaihdon kulutuksesta (~9 %).



Kuva 9. Diagrammi 1 polttoaineen kulutuksesta ja säästöistä



Kuva 10. Diagrammi 2 polttoaineen kulutuksesta ja säästöistä

8.3 Takaisinmaksuaika

Puhallinsaneerauksen takaisinmaksuajan laskemiseksi tarvittiin arvio puhallinsaneerauksen kokonaiskustannuksista, jotka koostuvat sekä puhaltimien jälleenmyyntihinnoista että vaihto- ja asennuskuluista

$$\text{Kokonaishankinta – ja asennuskulut [\$]} = 524\,052,86 \$ \quad (9)$$

Kun puhallinsaneerauksen kokonaiskustannukset tiedetään, on puhallinsaneeraukselle laskettavissa takaisinmaksuaika seuraavasti

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Kokonaishankinta – ja asennuskulut [€]}}{\text{Vuositainen energiansäästö} \left[\frac{\text{€}}{\text{a}} \right]} \quad (10)$$

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{524\,052,86 \$}{549\,826,10 \$/a} = 0,953 a = 11,4 \text{ mo.}$$

Risteily-yhtiöltä kuluisi siis noin 11,4 kuukautta, jolloin puhallinsaneerauksen tuottamat säästöt energikulutuksessa ovat yhtä suuret kuin saneerauksen aiheuttamat kokonaiskustannukset.

8.4 Päästövaikutukset

Puhallinsaneerauksen tuottamat säästöt polttoaineenkulutuksessa olisivat ympäristön kannalta merkittäviä. Koostetusta excel-laskurista saadaan samalla tietoon, kuinka paljon risteilyaluksen tuottamat kasvihuonekaasupäästöt voivat pienentyä vuosittain.

Taulukko 3. Kasvihuonekaasupäästöjen säästöt

| Savings in GHG-emissions | | |
|--|---------|------|
| Tank-to-Wake-pollutant emissions / MGO | | |
| Saved Annual NOx emissions | 10.86 | mt/a |
| Saved Annual SOx emissions | 1.58 | mt/a |
| Saved Annual PM emissions | 0.74 | mt/a |
| Saved Annual CO2 emissions | 2507.46 | mt/a |

Taulukko 4. MGO_{0.1} päästökertoimet

Emission factors

| | [g/kWh] |
|--------------------------|-----------------------------|
| MGO_{0.1} | |
| NO _x | 2.55 |
| SO _x | 0.37 |
| PM | 0.173 |
| | [gCO _{2e} /g fuel] |
| CO _{2e} -factor | 3.206 |

Taulukossa 4 on säästettyjen Tank-to-Wake-päästöjen määrät laskettuina taulukon 5 päästökertoimien avulla. Päästölaskennat perustuvat 0,1 %-rikkioksidipitoisen MGO-polttoaineen päästökertoimiin (Sphera 2021, 78 & 140).

Säästöt on laskettu seuraavilla kaavoilla

$$\text{Vuositteiset NO}_x \text{ - säästöt} = \text{Vuositteinen energiasäästö} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * \text{NO}_x \text{ - kerroin} * 10^{-6} \quad (11)$$

$$\text{Vuositteiset SO}_x \text{ - säästöt} = \text{Vuositteinen energiasäästö} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * \text{SO}_x \text{ - kerroin} * 10^{-6} \quad (12)$$

$$\text{Vuositteiset PM - säästöt} = \text{Vuositteinen energiasäästö} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * \text{PM - kerroin} * 10^{-6} \quad (13)$$

$$\text{Vuositteiset CO}_{2e} \text{ - säästöt} = \text{Vuositteinen energiasäästö} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{a}} \right] * \text{CO}_{2e} \text{ - kerroin} * 10^{-6} \quad (14)$$

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella keskenään erityyppisten puhaltimien energiatehokkuutta osana risteilyaluksen ilmanvaihtojärjestelmiä ja selvittää millaisia vaikutuksia puhallinvalinnan optimoinnilla voitaisiin saavuttaa. Alusten ilmanvaihdon koostaessa kolmanneksen laivan sähköenergiankulutuksesta ja noin kymmenyksen polttoaineenkulutuksesta, on selvää, että kohtuullisillakin säästöillä saavutettaisiin noteerattavia tuloksia.

Tämän tutkielman lopputuloksena syntyi helppokäyttöinen ja mukautettava laskentatyökalu, joka opinnäytetyössä käsitellyn esimerkkitapauksen lisäksi on sovellettavissa myös muille risteilyaluksille ja -yhtiöille. Tutkielman pohjatiedot ilmanvaihtolaitteiden teknologioista ja laivojen ominaisuuksista, kuten muun muassa polttoaineenkulutuksista ja -hinnoista, on osittain saatu julkisista lähteistä, jotka eivät antaneet kovin yksityiskohtaisia tietoja. Tutkielman tuottamat tulokset ovat siis erinäisistä lähteistä poimittujen tietojen pohjalta luotujen arvioiden varassa eivätkä sellaisenaan välttämättä anna eksakteja lukemia. Opinnäytetyön osana luodun laskurin toimintaperiaate on kuitenkin rakennettu siten, että laskurin käyttö ja uusien, tarkempien laskelmien luominen projektien arviointia varten on yksinkertaista.

Esimerkkisaneerauksen laskelmassa tuloksena saatiin noin 9,28 prosentin säästöt ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutuksesta, joka kielii vahvasti puhaltimien energiatehokkuuden merkityksestä kokonaiskulutuksesta puhuttaessa. Tämän tasoisia säästöjä on realistista ja järkevää – jopa elintärkeää tavoitella, jotta vuoden 2050 hiilineutraaliustavoitteisiin voitaisiin päästä. Tavoitteiden saavuttaminen vaatii nyt ja tulevaisuudessa lisää innovaatioita ja uusia teknologioita, joilla risteilytoiminnasta saadaan ympäristön kannalta kestävämpi matkailun muoto.

Tämän tutkielman kaltaisia pohdintoja yrityksessä on tehty aiemminkin, mutta tämä opinnäytetyö perehtyi aiheeseen syvemmin ja laajemmasta näkökulmasta. Opinnäytetyön tulokset tullaan esittelemään yrityksessä laajemmin ja laskuria jatkoyöstetään yrityksen käyttöön vielä yksityiskohtaisemmin. Työn aihe oli tarpeellinen, jotta voidaan jatkossa paremmin ymmärtää ja markkinoida puhallinsaneerauksien merkitystä niin laivojen järjestelmien eliniän pidentämiseksi kuin ympäristöystävällisyydenkin kehittämiseksi.

LÄHTEET

ABB julkaisuaika tuntematon. Heating, ventilation, air conditioning (HVAC). Verkkojulkaisu. <https://new.abb.com/marine/energy-efficiency/hvac> . Viitattu 18.12.2023.

CLIA 2023. Charting the Future of Sustainable Cruise Travel. Verkkojulkaisu. https://cruising.org/-/media/clia-media/stratcom/charting-the-future-of-sustainable-cruise-travel_october-2023 . Viitattu 02.02.2024.

Cruise HVAC: antiviral and energy efficiency innovations revealed 2022. Passenger ship technology 2nd Quarter 2022, 32-34.

CruiseMapper 2024. Quantum Of The Seas. <https://www.cruisemapper.com/ships/Quantum-Of-The-Seas-802> . Viitattu 02.01.2024.

Direktiivi 2016/802/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi tiettyjen nestemäisten polttoainneiden rikkipitoisuuden vähentämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti 21.5.2016. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/?uri=CELEX%3A32016L0802> . Viitattu 22.03.2024.

DNV 2023. Maritime Forecast to 2050 - ship technologies, fuels and fuel production in focus. Webinaari. YouTube-videopalvelu, julkaistu 28.09.2023. <https://www.youtube.com/watch?v=mk4tvWX2Ny4> . Viitattu 14.02.2024.

DNV julkaisuaika tuntematon. Vessel Register. Quantum Of The Seas. <https://vesselregister.dnv.com/vesselregister/details/32027> . Viitattu 22.01.2024.

ebm-papst 2022. EC centrifugal fans RadiPac – C. Tekninen esite. Ladattavissa osoitteessa <https://www.ebmpapst.com/de/en/support/downloads/brochures-and-catalogs.html> . Viitattu 14.12.2023.

Euroopan parlamentti 2021. EU:n ilmastolaki: parlamentti hyväksyi ilmastoneutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Lehdistötiedote. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20210621IPR06627/ilmastolaki-eu-parlamentti-hyvakysi-ilmastoneutraaliuden-vuoteen-2050-menessa> . Viitattu 22.11.2023.

FläktWoods julkaisuaika tuntematon. Centrimaster GX. Tekninen esite. Sisäinen tietolähde. Viitattu 14.12.2023.

Gelair 2023. The Importance Of Air Quality Treatment In Ships. Gelair blogi. 31.05.2023. <https://www.gelair.co.id/en/blog/the-importance-of-air-quality-treatment-in-ships/> . Viitattu 21.02.2024.

IMO 2020. Fourth IMO Greenhouse Gas Study. Pdf-tiedosto. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf> . Viitattu 22.11.2023.

Jansson, Tove 2010. Muumipapan urotyöt. 22. painos (suom. Laila Järvinen ja Päivi Kivelä). Helsinki: WSOY.

Koja julkaisuaika tuntematon. Meistä - Koja Group. Verkkojulkaisu. <https://www.koja.fi/meista/koja-group/> . Viitattu 22.03.2024.

Resolution MEPC.320(74) 2019. 2019 Guidelines for consistent implementation of the 0.50% sulphur limit under MARPOL Annex VI. Saatavilla osoitteessa <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> . Viitattu 22.03.2024.

Resolution MEPC.377(80) 2023. 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships. Saatavilla osoitteessa <https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/MEPC.aspx> . Viitattu 22.11.2023.

Royal Caribbean Group 2023. Royal Caribbean Group Reports Third Quarter Results and Increases Full Year Guidance. Verkkojulkaisu. <https://presscenter.rclcorporate.com/press-release/196/royal-caribbean-group-reports-third-quarter-results-and-increases-full-year-guidance/> . Viitattu 22.03.2024.

Royal Caribbean International Press Center julkaisuaika tuntematon. Ship Fact Sheets: Quantum Of The Seas. Verkkojulkaisu. <https://www.royalcaribbeanpresscenter.com/fact-sheet/27/quantum-of-the-seas/> . Viitattu 25.01.2024.

Sandberg, Esa 2016a. Ilmastointilaitoksen mitoitus: Ilmastointitekniikka osa 2. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy, 148.

Sandberg, Esa 2016b. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät: Ilmastointitekniikka osa 1. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy, 174–176.

SFS-EN ISO 7574. 2002. Ships and marine technology. Air-conditioning and ventilation of accommodation spaces. Design conditions and basis of calculations (ISO 7547:2002). Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Shipwright julkaisuaika tuntematon. HVAC Efficiency Studies. Verkkojulkaisu. <https://www.shipwright.biz/hvac-efficiency> . Viitattu 18.12.2023.

Sphera 2021. 2nd Life Cycle GHG Emission Study on the Use of LNG as Marine Fuel. Ladattavissa osoitteessa <https://sphera.com/research/2nd-life-cycle-ghg-emission-study-on-the-use-of-lng-as-marine-fuel/> . Viitattu 22.03.2024.

Statista 2023. Cruise industry worldwide – statistics & facts. <https://www.statista.com/topics/1004/cruise-industry/#topicOverview> . Viitattu 31.01.2024.

Tanninen, Teemu 2023. Koja Technology Leader. Sisäinen luentomateriaali, Koja Oy. 26.10.2024.

Transport & Environment 2019. One Corporation to Pollute Them All – Luxury cruise air emissions in Europe. Pdf-tiedosto. https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/One-Corporation-to-Pollute-Them-All_English.pdf . Viitattu 13.02.2024.

University of Colorado Boulder 2016. How much fuel does a cruise ship use? Verkkojulkaisu. <https://www.colorado.edu/mechanical/2016/07/25/how-much-fuel-does-cruise-ship-use> . Viitattu 13.02.2024.