

Opinnäytetyö AMK

Kone- ja tuotantotekniikka

Meritekniikka

2020

Juho-Jaakko Laine

FAN COIL -YKSIKÖIDEN KÄYTTÖ LAIVAN ILMASTOINNIN TUKENA

– Energiansäästöpotentiaalin tarkastelu
perinteiseen jäähdytysjärjestelmään verrattuna

Juho-Jaakko Laine

FAN COIL -YKSIKÖIDEN KÄYTTÖ LAIVAN ILMASTOINNIN TUKENA

- Energiansäästöpotentiaalin tarkastelu perinteiseen
jäähdytysjärjestelmään verrattuna

Laivanrakennuksessa energiatehokkuusvaatimukset ovat kiristyneet muuttuneiden säädösten ja asetusten takia. Ilmanvaihto on yksi suurimpia ja arvokkaimpia yksittäisiä järjestelmiä, mitä laivaan asennetaan. Toimivalla ja kunnossa pidetyllä ilmastointijärjestelmällä on merkittävä vaikutus ihmisten viihtyvyyteen aluksella. Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia Fan coil -yksiköillä tuetun jäähdytysjärjestelmän energiansäästöpotentiaalia, verrattuna perinteiseen keskitettyyn jäähdytysjärjestelmään.

Työssä tarkastellaan jäähdytystarpeen muodostumista ja tilaan vaikuttavien lämpökuormien syntyä. Työssä käydään läpi keskeiset laivan ilmanvaihtoon liittyvät yksiköt sekä jäähdytysenergian tuotanto- ja jakelutapoja. Työssä osoitetaan laskennallisesti Fan coil järjestelmän käytönaikainen energiansäästöpotentiaali.

Työ on toteutettu tutustumalla alaan liittyvään kirjallisuuteen, standardeihin, määräyksiin sekä suunnittelu suosituksiin. Kokemukseen perustuvaa tietoa saatiin haastattelemalla alalla pitkään toimineilta laivan ilmastoinnin suunnittelijoilta. Työn tuloksena saatiin raportti lämpökuormien ja jäähdytystarpeen muodostumisesta laivassa sekä osoitettiin Fan coil järjestelmän teoreettinen energiansäästöpotentiaali.

ASIASANAT:

fan coil unit, laivanrakennus, ilmastointi, jäähdytys, lämpökuorma

Juho-Jaakko Laine

UTILISATION OF FAN COIL -UNITS TO SUPPORT AIR CONDITIONING OF A SHIP

- Examination of energy saving potential compared to a conventional cooling system

In shipbuilding, energy efficiency requirements have become stricter due to changes in rules and regulations. Air conditioning is one of the largest and most valuable individual systems installed on a ship. A functional and well-maintained air conditioning system has a significant impact on the comfort of people on board.

The purpose of this thesis was to investigate the energy saving potential of a cooling system supported by Fan coil -units as compared to a traditional centralized cooling system. The thesis examines the formation of cooling demand and the generation of thermal loads affecting the space. The work covers the main units of a ship's ventilation and the production and distribution of cooling energy. The work demonstrates the energy saving potential of the Fan coil system during operation.

The work was been carried out by studying the literature, standards, regulations and design recommendations. Experience-based information was obtained from interviews with long-established ship air conditioning designers in the industry. As a result of this work, a report on the generation of heat loads and cooling needs on board was obtained, and the theoretical energy-saving potential of the Fan coil system was demonstrated.

KEYWORDS:

fan coil -unit, ship building, air conditioning, cooling, heat load

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Taustat	6
1.2 Tavoitteet ja rajaukset	7
1.3 Toimeksiantaja	7
1.4 Aikaisemmat tutkimukset	7
2 LAIVAN ILMANVAIHTO JA JÄÄHDYTYS	8
2.1 Vaatimukset ja säädökset	9
2.2 Tuloilman prosessointi ja jakelu	10
2.3 Air Handling -Unit (AHU)	11
2.4 Chiller-vedenjäähdytysyksikkö	12
2.5 Jäähdytys	13
3 JÄÄHDYTYSTARPEEN MUODOSTUS	14
3.1 Lämpökuormat	15
3.2 Jäähdytystarpeen laskenta	18
4 FAN COIL -UNIT	21
4.1 Toimintaperiaate	21
4.2 Käyttökokemukset	21
5 ENERGIATALOUDELLINEN VERTAILU	23
5.1 Tulokset	23
5.2 Päätelemät	26
6 YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

KÄYTETYT LYHENTEET TAI SANASTO

FCU	Fan Coil -Unit, Konvektiopuhallin, joka sisältää liuoskiertoisen lämmönvaihtimen
AHU	Tuloilmakone, ts. Ilmanvaihtokone
CHILLER	Vedenjäähdytyskone
COP	Coefficient of Performance, hyötysuhde

KUVAT

Kuva 1. AHU-yksikkö.	11
Kuva 2. Chiller-yksikkö	12
Kuva 3. Fan Coil -Unit	22
Kuva 4. Lämpökuormalaskelma	23
Kuva 5. Jäähdytysenergiaan kulunut energia	26

1 JOHDANTO

1.1 Taustat

Työtä lähdettiin tekemään toimeksiantajan ehdotuksesta, koska aihetta on tutkittu hyvin vähän. Työtä apuna käyttäen olisi toimeksiantajalla mahdollisuus esittää asiakkaalle jäähdytysjärjestelmien suunnittelussa ja korjausrakentamisessa tehtävien valintojen energiansäästömahdollisuuksia sekä käyttökustannusten alentamiskeinoja.

Risteilyalusten ilmastoinnin jäähdytysjärjestelmät ovat yksi tärkeimmistä matkustajalusten mukavuutta ja turvallisuutta edistäviä kokonaisuuksia. Järjestelmien tärkein tehtävä on tuottaa aluksen sisätiloihin sellaiset lämpötekniset olot, että aluksella on turvallista ja miellyttävää olla. Teknisten- ja yleisten tilojen monimuotoisuus, lämpökuormien vaihtelu sekä merenkulkua koskevat säädökset tarkastelluissa tiloissa asettavat haasteita kustannustehokkaan ja toimivan kokonaisuuden rakentamiseksi.

Laivanrakennuksessa energiatehokkuusvaatimukset ovat kiristyneet muuttuneiden säästösten ja asetusten takia, sekä aluksien tilaajien tahoilta. Suurten läpivientien määrää laipioissa halutaan vähentää kustannustehokkuuteen ja turvallisuuteen perustuen. Tämä trendi jatkuu myös tulevaisuudessa ja matkustajien tietoisuus asiasta vaikuttaa ostopäätöksiin. Käyttövoiman maksimaalinen hyödyntäminen, turhien ja päällekkäisten toimintojen poistaminen, sekä ympäristöystävällisyys ovat varustamon ja matkustajan yhteisiä asioita.

Energiatehokkuudella säästetään huomattavia summia aluksen elinkaaren aikana, joka suoranaisesti tarkoittaa kiinteiden käyttökustannusten alenemista ja lisäävän sijoituksen tuottavuutta.

1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tämän työn tavoitteena on tutkia FCU-yksiköiden käyttöä aluksen yleisten tilojen jäähdytykseen ja konstruktion tuomaa energiansäästöä verrattuna perinteiseen jäähdytysjärjestelmään. Perinteisessä jäähdytysjärjestelmässä tuodaan suuri ilmamäärä keskusyksiköltä jäähdytettävään tilaan. Tämän ilman käsittelyyn kuluu paljon energiaa, koska ilmamassa kuivatetaan ja jäähdytetään suunnitellulle tasolle.

Työ rajataan alueellisesti koskemaan aluksen 400 paikkaista pääravintola tilaa. Työ tarkastelee vain kohdennettuun tilaan jäähdytyksestä syntyviä energiasäästöpotentiaalia.

1.3 Toimeksiantaja

Toimeksiantajana opinnäytetyölle toimii Elomatic Oy. Elomatic on perustettu vuonna 1970, ja yhtiön perustaja, teollisuusneuvos Ari Elo, on edelleen mukana yrityksen toiminnassa. Turkulaisen Elomaticin toiminta-alue on laaja ja toimistoja Elomaticilla on Suomessa, Puolassa, Hollannissa, Intiassa, Kiinassa, Serbiassa, Venäjällä, Italiassa ja Yhdistyneissä Arabiemiirikunnissa. Elomatic työllistää noin 800 työntekijää ja pystyy palvelemaan asiakkaitaan maailmanlaajuisesti. Elomatic tuottaa pääosin insinööri-, ohjelmistokehitys- ja konsultointipalveluita asiakkaan tarpeisiin. Oman 3D-suunnitteluohjelmiston kehittäminen aloitettiin 80-luvulla, ja ohjelma tunnetaan nykyään nimellä Cadmatic. Se on markkinoiden johtavimpia laiva- ja teollisuussuunnitteluun suunnatuista 3D-suunnitteluohjelmistoista. (Elomatic 2020.)

1.4 Aikaisemmat tutkimukset

Työssä tutkittiin vastaavia julkaisuja aiheesta, mutta löydetyt tutkimukset koskevat pääsääntöisesti itse FCU-yksiköitä ja niiden energiatehokkuuden parantamista. Työn edetessä havaittiin lähdeaineiston vähäisyys, varsinkin laivanrakennuksen osalta. Muutamia tutkimuksia ilmanvaihdon kokonaisenergiatehokkuudesta löydettiin, mutta niissä ei kuitenkaan käsitelty FCU- yksiköitä. Henkilöhaastatteluiden tuloksina kävi ilmi, että tällaiset tutkimukset ovat usein yritysten itse tekemiä ja ovat näin ollen kilpailuvaltteja.

2 LAIVAN ILMANVAIHTO JA JÄÄHDYTYS

Ilmanvaihto on yksi suurimpia ja arvokkaimpia yksittäisiä järjestelmiä joita laivaan asennetaan. Toimivalla ja kunnossa pidetyllä ilmastointijärjestelmällä on merkittävä vaikutus ihmisten viihtyvyyteen aluksella. Vaikka kokonaisviihtyvyys on yksilön subjektiivinen käsite, niin se voidaan kuitenkin jakaa tarkoituksellisiin tekijöihin. Näistä tekijöistä lämpöviihtyvyys ja lämpötasapaino ovat viihtyvyyden tarkastelussa tämän tutkimuksen kannalta keskeisempiä tekijöitä. Näihin tekijöihin ilmanvaihtojärjestelmällä on huomattava vaikutus. Viihtyvyyden kannalta ei ole samantekevää, ruokaileeko tilassa, johon on suunniteltu kuntosalin ilmanvaihto ja vastavuoroisesti kuntoileeko tilassa, jossa on rauhallisen illallisravintolan ilmanvaihto. (Laine 2019; Bergman 2019.)

Sisäilman laatuun asetetaan usein erilaisia vaatimuksia, joihin voidaan tarpeeseen sovitulla järjestelmällä vaikuttaa tehokkaasti. Risteilyaluksissa nämä vaatimukset ovat pääsääntöisesti ihmisperäisiä ja joidenkin konetilojen vaatimia erikoisolosuhteita. Prosessikäytössä olevien tilojen, esimerkiksi keittiöiden ja penttereiden ilman puhtaus ja kosteuden tiivistymisen välttäminen, ovat esimerkkejä tilojen vaatimuksista ilman laatuun. Sisäilman laatuun pystytään vaikuttamaan jo suunnittelu vaiheessa, kun tiedetään tilan käyttötarkoitus ja arvioidaan tilaa kuormittavat lämmön- ja kosteuden lähteet. (Sandberg 2014. 21)

Ilmanvaihdon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on tuottaa tilaan puhdasta, happipitoista hengitysilmaa ja poistaa samalla uloshengityksestä vapautunut hiilidioksidi sekä ilman epäpuhtaudet. Lämpökuormien eliminointi oleskelutiloista, sekä sähkölaitteiden toimivuuden varmistaminen niille varatuissa tiloissa. Ihmisen hapenkulutus ja hiilidioksidin tuotto on aineenvaihdunnan tehon tulos ja näin matemaattisesti mallinnettavissa, mutta tässä tutkimuksessa siihen ei oteta kantaa, koska se ei voi olla ilmanvaihdon mitoituksen kriteeri. Merenkulun säädökset määrittelevät tilaan tuotettavan ilman määrän, joka ylittää laskennallisesti yhden henkilön hapenkulutuksen ja hiilidioksidin tuoton tulokset selvästi. (Sandberg 2014. 21)

Ilmanvaihtojärjestelmiin kuuluu myös turvallisuutta lisääviä ominaisuuksia, kuten tilojen savunpoistojärjestelmät, jolloin tilat saadaan tyhjennettyä savukaasuista tai muista ilmanlaatua heikentävistä kaasuista sekä aerosoleista. (Laine 2019.)

2.1 Vaatimukset ja säädökset

Laivan ilmanvaihtoon liittyy vaatimuksia ja säädöksiä, joita suunnitteluvaiheessa tulee noudattaa. Riippuen tilan käyttö tarkoituksesta vaatimukset ilmanvaihdolle määrittelee yhteisesti ISO-7547-standardi, ILO, SOLAS ja IMO. Näiden lisäksi luokituslaitokset määrittelevät omat vaatimuksensa, jotta alus saa luokituksen kautta vakuutuksen. (Laine 2019.)

ISO-7547-standardi määrittelee sisäilman lämpötilan +27 °C ja suhteellisen kosteuden 50 %, kun ulkolämpötila on +35 °C ja suhteellinen kosteus 70%. Nämä ovat raamit. Sisäilman maksimiarvoja, joihin tulee vähintään pyrkiä, vaikka ulkoilmassa vallitsisi standardista eriävät lämpö- ja kosteusarvot. Usein risteilyaluksissa yleisten alueiden sisäilma suunnitellaan lämpöviihtyvyyden kannalta 22–23 celsiusasteiseksi, ilmansuhteellisen kosteuden ollessa 40–50 %. (ISO-7574 2018.)

ISO-7547 standardi määrittelee vähimmäismäärän happipitoisen raittiin ilman tuomisesta tiloihin, joka on 0,008 m³ henkilöä kohden sekunnissa. Standardi määrittelee myös yksittäisten tilojen, esim. yleiset WC:t, pesulat, kuivaushuoneet ja sairaalan kokonaisen ilmanvaihdon määrän tunnissa, riippumatta henkilökapasiteetista. Nämä tilat yleensä alipaineisia, koska poistoilman määrä on 1–5 % suurempi kuin tuloilman määrä. (ISO-7574 2018.)

Tulo- ja poistoilman suhteeseen standardi määrittelee säädöksen, jossa ruokailutiloissa poisto- ja tuloilman määrät tulee olla samat. Tämä säädös on ristiriidassa alalla yleisesti käytössä olevaan yleisten tilojen lievään ylipaineistamiseen tähtäävällä suunnittelulla. Poistoilman määrä on haastatteluissa saadun tiedon sekä laskelmien mukaan alle 2% suurempi kuin tuloilman määrä. (Laine 2019; Bergman, 2019.)

2.2 Tuloilman prosessointi ja jakelu

Ilmanvaihtoon käytettävää raitisilmaa prosessoidaan ennen jakelua monin tavoin. Riippuen alueesta, johon ilma johdetaan, se yleensä lämmitetään kosteuden poiston helpottamiseksi, jonka jälkeen jäähdytetään suunnitellun mukaiseksi. Aluksen operointi alueen vallitsevasta ilmastosta riippuu käsittelyn tarve ja siihen kuluvan energian määrä. Ideaalitulanteessa tuloilman käsittelyyn riittäisi epäpuhtauksien suodatus. Kuitenkin lähes aina risteilyaluksissa tarvitaan tuloilmalle käsittely, jotta se olisi standardien mukaista jaettava. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

Tavallisesti tuloilmaa käsitellään mahdollisimman paljon vastaamaan tilaan suunniteltuja lämpötekniisiä ominaisuuksia, huomioiden kansainväliset standardit ilmanlaadusta. Mitä lähemmäs tavoiteltuja sisäilman lämpötekniisiä arvoja päästään, sitä vähemmän tarvitaan tilassa tehtävää ilmankäsittelyä. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

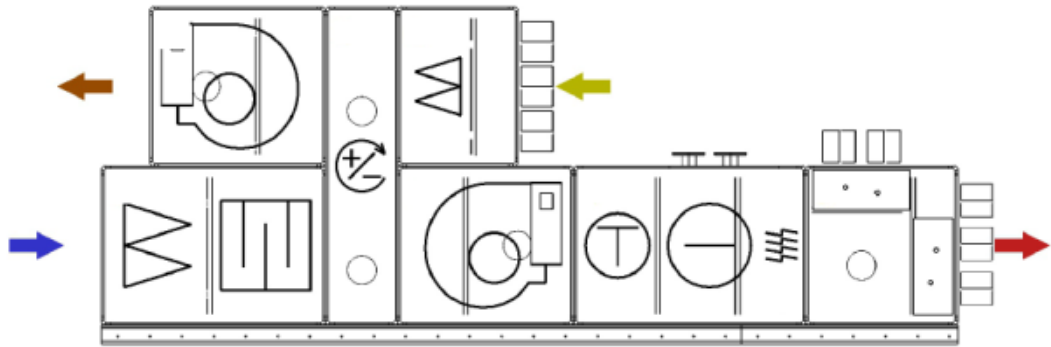
Tuloilman jakelussa käytetään isoja suorakaidekanavia, joista ilma johdetaan suunnattuihin tiloihin. Ilman jakelu tuloilma-alueittain tapahtuu kierresaumakanavia pitkin ja lopullinen ilmanjako tilaan laminaarisena virtauksena rakokattojakelun avulla. Tämä jakelutapa on tehokas ilmanjaon menetelmä, kun isojen jäähdytyskuormien vuoksi tarvitaan suuria tuloilmavirtoja. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

Ilman jakeluun ISO-7547 standardi määrittelee ilman lämpötilan kohoamiselle rajoituksia kanavistossa, jonka takia tuloilmakanavat eristetään. Kanavanopeudet aluksessa määrittelee pääsääntöisesti asiakas, mutta hyvää suunnittelu- ja laivanrakennustapaa noudattaen kanavanopeuksille on ohjeelliset maksiminopeudet. Suurista kanavanopeuksista aiheutuu häiritsevää ääntä, sekä painehäviöt ovat suurempia. Samainen standardi määrittää tuloilman ja tuloilma-alueen lämpötila eron, joka ei jäähdytys tilanteessa saa olla yli +10°C. (ISO-7574, 2018.)

2.3 Air Handling -Unit (AHU)

AHU on keskeisin laitekokonaisuus välillisessä jäähdytysjärjestelmässä, jolla prosessoidaan ulkoilmasta otettu raaka ilma suunnitellun mukaiseksi ja alueelle jaettavaksi. Työssä tarkasteltavaa aluetta palvelee yksi AHU-yksikkö (Kuva 1.), joka on jaettu palvelemaan kolmea eri aluetta. Yksikön jäähdytysteho on kokonaisuudessaan 309kW ja maksimi ilmavirran ollessa 7,48 m³/s.

Yksikkö koostuu lämmitys- ja jäähdytys-elementeistä, lämmönsiirtimistä, lämmöntalteenoton elementistä sekä aluekohtaisista jakopuhaltimista.



Kuva 1. AHU-yksikkö Lähde. Koja Oy

AHU- ja vedenjäähdytysyksiköiden hyötysuhteet ovat nykyaikana varsin korkeat. Molempien yksiköiden hyötysuhteeksi mitataan jopa yli 5 COP arvoja, joka tarkoittaa, että järjestelmään syötettyä 1 kilowattia sähköenergiaa kohden saadaan 5 kilowattia jäähdytysenergiaa. (Koja Oy. 2018.) Näin ollen voidaan arvioida tilojen jäähdytykseen kuluvaan energiaan kokonaismäärää sekä energiantuotantoon kuluvaan energiaan. Laivoilla voidaan öljynhintaan tai tapauskohtaiseen pääkäyttövoimaan perustaa arvio sähköenergian hinnasta. Tässä työssä arvioidaan laivassa tuotetun energian hinnaksi 0,05€/kWh.

2.4 Chiller-vedenjäähdytysyksikkö

Chiller-yksikkö (kuva 2) on kone, joka poistaa liuksesta lämpöä höyrykompression tai absorptiojäähdytyksen avulla. Tätä liuosta voidaan sitten kiertää lämmönvaihtimen kautta laitteiden tai ilman jäähdyttämiseksi.

Ilmastointijärjestelmissä käytetty jäähdytetty liuos jaetaan tyypillisesti lämmönvaihtimiin tai käämeihin AHU-yksiköihin, jotka jäähdyttävät ilmaa. Liuos kierrätetään sitten jäähdyttimeen uudelleenkierrätettäväksi. Nämä jäähdytyskelat siirtävät tuntuvaa lämpöä ja latenttia lämpöä ilmasta jäähdytettyyn veteen, jolloin jäähdyttävät ja kuivattavat ilmavirtaa.

FCU yksiköihin johdetaan Chiller-yksikön tuottamaa jäähdytettyä liuosta. FCU yksikön putkissa kiertää tavanomaisesti 6-8C° astainen liuos, joka toimii lämmönsiirtimenä lamellipakassa. Liuoksen lähtö lämpötila riippuu laitekohtaisista asetuksista, mutta tavallisesti lämpötila asettuu 12-14C° asteen väliin.

Jäähdytysliuoksen sisältämää jäähdytysenergiaa voidaan arvioida laskutoimituksella $P \text{ [kW]} = q \text{ [l/s]} * \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]} * 4,2$

Chiller-yksiköissä on myös lämmöntalteenotto järjestelmä, joka mahdollistaa jättoenergian käyttämisen muihin tarpeisiin



Kuva 2. Chiller-yksikkö Lähde Koja Oy

2.5 Jäähdytys

Suurten alusten sisäilman jäähdytykseen käytetään nykyaikana keskitettyä, välillistä jäähdytys järjestelmää. Tämä järjestelmä sisältää vedenjäähdytyskoneiston sekä tuloilman jäähdytyspatterin, jossa kiertää jäähdytetty liuos. Vedenjäähdytyskoneisto jäähdyttää inhibiittori pitoista liuosta, joka usein on vettä tai vesiglykoli seosta. Jäähdytyspatteri on usein sijoitettu tuloilmakoneen sisälle tai vaihtoehtoisesti suoraan puhallus kanavaan. Tällä järjestelmällä saadaan jäähdytettyä tuloilma, joka jaetaan alueille kokonaisilmanvaihdon tarpeen mukaan. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

Ilmanvaihtotarpeen mukainen raittiin tuloilman määrä jäähdytettynä ei aina riitä tilan jäähdyttämiseen, johtuen tilaan kohdistuvista lämpökuormista. Näiden lämpökuormien tasaamiseen käytetään tilakohtaisia sekä paikallisia jäähdytyslaitteita, jotka ovat puhalltimella ja suodattimella varustettuja jäähdytyspattereita, FCU-yksiköitä. Näissä puhallinkonvektoreissa kiertää vedenjäähdytyskoneiston jäähdyttämä liuos. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

Puhallinkonvektoreiden avulla saadaan kierrätettyä ja samalla jäähdytettyä tilassa olevaa lämpökuormitettua ilmamassaa, jolloin jäähdytys tehoa pystytään keskittämään alueellisesti. Tällöin lämpötilan muutos, joka muodostuu alueen jäähdytetyn tuloilman ja lämpökuormitetun ilman välille on pieni, verrattuna prosessoitavaan ulkoilmaan. Näin hyödytään tilaan tuotavan ilmanmäärän volyymin pienemisellä, kanavanopeuksien laskulla, sekä kanavakokojen pienenemisellä. Jäähdytyksen hyötysuhdetta saadaan kasvatettua, kun jäähdytysenergian väliaineena on liuos, joka sitoo energiaa itseensä paremmin kuin ilma. (Laine, 2019; Bergman 2019.)

3 JÄÄHDYTYSTARPEEN MUODOSTUS

Jäähdytettäviin tiloihin kohdistuu sisäisiä- ja ulkoisia lämpökuormia, joiden vaikutuksista muodostuu tilaan jäähdytystarve. Sisäisesti tilaa lämpökuormittavia esimerkkejä ovat tilassa oleilevat ihmiset, valaistus ja sähkölaitteiden luovuttama lämpöteho. Ulkoisiksi esimerkinä auringon säteily ikkunapinnoista sekä rakenteista, sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero ja erotuksen johtuminen rakenteiden kautta tilaan. Ulkoista lämpökuormaa tilaan kohdistuu myös ilmanvaihdon kautta, jos tuloilma on käsittelemätöntä. (Aittomäki, 2012. 322-324)

Lämpökuormat aiheuttavat tilaan tuntuvaa lämpötehoa, joka luo tuntevan jäähdytystehon tarvetta. Kun tilassa oleilee ihmisiä tai muuta ilmankosteutta lisäävää, lämpökuormitukseen liittyy kosteuskuorma, joka lisää tuntuvaa jäähdytystehon tarvetta. Ilman korkea kosteuspitoisuus nostaa ilman energiasisältöä eli entalpiaa. Jäähdytystehon kokonaistehon tarve on siis tuntevan jäähdytystehon ja kosteuskuorman poiston, eli latentin jäähdytystehon summa. (Aittomäki, 2012. 322-324)

Yleisesti sisäiset- ja ulkoiset lämpökuormat tuottavat tilaan ainoastaan tuntuvaa lämpökuormaa ja siten tuntuvaa jäähdytystarvetta, mutta tarvetta latenttiin jäähdytystarpeeseen tulee ulko- ja tavoitellun sisäilman entalpioiden erotuksesta, jos tuloilma on käsittelemätöntä. Tilassa oleilevien ihmisten latentista lämpökuormasta johtuu suurin latentin jäähdytystehon tarve. (Aittomäki, 2012. 322-324)

Auringon lämpösäteily on tyypillisesti ulkoisista lämpökuormista suurin. Säteilykuorman suuruuden yksinkertainen arviointi on haasteellista, koska säteilyvoimakkuus vaihtelee vuodenajan, säätilan, vuorokaudenajan ja ikkunoiden ilmansuunnan mukaan. Monivaiheinen laskennallinen menetelmä auringon lämpökuorman arviointiin on esitetty esimerkiksi kirjassa *Ilmastointilaitoksen mitoitus*. (Sandberg, 2014. 430)

Aluksissa ulkoilman kosteuskuormitus on suurin latenttia jäähdytystarvetta lisäävä kuorma. Rakenteista aiheutuvien vuotojen lämpökuorman vaikutusta ei oteta käytännössä huomioon sen pienen vaikutuksen takia ja koska ilmastointi suunnitellaan ylipaineiseksi. (Aittomäki, 2012. 322-324)

3.1 Lämpökuormat

Lämpökuormien tiedostaminen ja jakaminen tuntuvaksi sekä latenttiseksi kuormitukseksi on jäädytystarpeen suunnittelun kannalta tärkeää. Tuntuva lämpöteho kasvattaa tilan ilman lämpötilaa mutta ei nosta alueen kosteusprosenttia. Latentti lämpöteho kasvattaa ilman kosteuspitoisuutta, jolloin ilman entalpia nousee, vaikka ilman lämpötila muuten pysyisi muuttumattomana. Kostea ilma siis sitoo itseensä energiaa enemmän kuin kuiva ilma. Alueen käyttöaste ja käyttötarkoitus tulee tietää sekä näiden tietojen avulla tulee määrittää painokerroin eri lämpökuorma lajeille. Kun tiedetään alueen lämpökuormitus ja se on eritelty, saadaan tarvittava jäähdysteho alueelle laskettua. Eri menetelmiä lämpökuormien laskentaan on muutamia, mutta tässä työssä keskitytään ISO:7547 standardin määrittelemiin laskukaavoihin.

Huomioitavat alukseen kohdistuvat lämpökuormat on jaoteltu ISO:7547 standardissa alakategorioihin. Alukseen vaikuttava auringon säteily kuorman määrä watteina selviää kaavalla,

$$\Phi_{aurinko} = \sum A_v K \Delta T_r + \sum A_g G_s$$

iossa,

A_v on auringon säteilylle oleva altis pinta [m²]

K on konvektio kerroin, alttiina olevalle pinta-alalle [W/m²K]

ΔT_r on pintalämpö kerroin, pinnasta muodosta ja värisävystä riippuen [K]

A_g on ikkuna pinta-alan määrä [m²]

G_s on ikkunan lämpökuorman määrä neliömetrille [W]

Φ_{au} on alueelle kohdistuvan lämpökuorman määrä [W]

Tilassa työskentelevien tai oleilevien ihmisten lämpöteho on yleensä suurin latenttisen lämpökuorman tuottajista tilaan, ellei tilassa ole muita merkittäviä vesihöyryn tuottajia. Tilaan kulkeutuvaa kosteata ulkoilmaa, esim. avoimen ikkunan kautta ei laskennassa mallinneta, koska tilat suunnitellaan hieman ylipaineisiksi. (ISO-7574, 2018.)

Yhden henkilön tuoma tuntuva ja latentti lämpökuormitus tilaan on laskennallisesti 85W tuntuva ja 150W latenttia kuormaa, sisäilman ollessa 27 °C (ISO 7547, 2018.)

Tilaan suunnitellulla henkilökapasiteetilla kertomalla saadaan, tuntuva ja latentti lämpökuormitus, mikä vaikuttaa oleellisesti lämpöviihtyvyyteen tilassa. (ISO 7730, 2018.)

$$\Phi_{tuntuva} = 0,085kW * n_i \qquad \Phi_{latentti} = 0,15kW * n_i$$

Tilassa olevat koneet ja laitteet tuottavat tilaan laskennallisesti pelkkää tuntuva lämpökuormaa, johtuen sähkölaitteiden lämpötehoista. Nämä tehot yleensä arvioidaan kokonaiskuormitukseen suoraan valmistajan antamilla tiedoilla. ISO-7547 standardi antaa yleisohjeistuksen sähkölaitteiden tuoman kuormituksen laskemiseksi tilaan. Jääkaapit sekä niitä vastaavat kylmälaitteiden tuottama teho lasketaan 0,3kW / litra. Teknologian kehittyessä standardi ei enää merkitse televisioita, radioita, yms. pientä väliaikaisesti käytettävää sähkölaitetta, tilaa lämpökuormittaviksi laitteiksi. Suuremmat näytöt ja muut informatiiviset laitteet lasketaan valmistajien ilmoittaman tehon tuoton mukaan. (ISO 7547, 2018.)

$$\Phi_{laite} \approx (arvio) kW$$

Valaistus tuottaa laskettavaan tilaan lämpötehoa, joka on tuntuva ja tilan ilmaa lämmitävää kuormaa. Tässä tapauksessa standardi on teknologian kehityksessä myöhässä, koska valaistus on usein toteutettu LED- tekniikkaa hyväksikäyttäen. Tällöin on mahdollista samalla valoteholla kuormittaa ympäristöä vain 85% ottotehosta neliometriä kohden. (Ledmagazine, 2020.) Yleisesti alalla lasketaan LED- tekniikalla tuotetun valaistuksen kuormittavan alle 5W / m². Standardi ohjeistaa kuitenkin laskemaan tilan käyttö tarkoituksen mukaan 8-,10- tai 20W / m². (ISO 7547, 2018.)

$$\Phi_{valaistus} = 0,01kW * m^2$$

Aluksen laipioista tai kannesta johtuvaa lämpökuormien lisääntymistä ja poistumista, pystytään arvioimaan ISO-7547 standardin määrittelemällä laskutavalla. Tämä laskutoimitus tehdään jokaiselle tilaa rajaavalle pinnalle, jolloin saadaan rakenteiden lämpökuormittavuus selville.

$$\pm\Phi_k = \Delta T(K_v A_v) + (K_g A_g)$$

jossa,

$\pm\Phi_k$ on lämmön lisäys tai poistuminen rakenteiden kautta [W]

ΔT on lämpötila ero jäähdytetyn tilan ja ulkoilman välillä [K]

K_v on pinnan A_v konvektio kerroin [W/m²K]

K_g on pinnan A_g konvektio kerroin [W/m²K]

A_v on laipion pinta-ala, pl. ikkunat ja niiden kehykset [m²]

A_g on ikkunoiden ja kehysten pinta-ala [m²]

Kokonaisarvion tilaan vaikuttavasta lämpökuormituksesta saa, edellä mainittujen lämpökuormien syntyminen ja niiden todentamiseen käytettäviä laskukaavoja. Summaamalla lasketut arviot, eri kuormituslajeista saadaan yhdistetty lämpökuormitus tilalle.

$$\Phi_{tot} = \Phi_{tuntuva} + \Phi_{latentti} + \Phi_{valaistus} + \Phi_{laite} + \Phi_{aurinko} + (\pm\Phi_k)$$

3.2 Jäähdytystarpeen laskenta

Tilan jäähdytystehontarpeen arviointi on lämmitystarpeen arviointia haastavampaa. Arvioinnin haastavuus johtuu siitä, että tila johon arviointi tehdään ei termisesti ole staattisessa tilassa, toisin kuin tilan lämmitys suunnittelussa voidaan olettaa. Jäähdytystarpeen arviointiin käytetään energiasimulointiohjelmistoja, joka laskee moniulotteisesti tilaan kohdistuvia lämpökuormia ja vastaavasti jäähdytystehon tarpeen. Yleensä suunnittelutoimistoilla on omiin tarpeisiinsa suunniteltu ja räätälöity ohjelma, joka laskee ISO-7547 standardissa määritellyllä tavalla tilaan kohdistuvat kuormat.

Jäähdytystarpeen laskennassa erotetaan käsitteet lämpökuorma, jäähdytyskuorma sekä jäähdytysteho toisistaan. Lämpökuorma on tilaa lämmittävä kokonaislämpöteho, joka saadaan laskemalla yhteen tilan sisäiset ja ulkoiset lämpökuormat. Tilan jäähdytyskuorma on se teho, joka tarvitaan sisäilman pitämiseen halutussa lämpötilassa. Jäähdytysteholla taas tarkoitetaan sitä hetkellistä tehoa, jolla jäähdytyslaitteet kulloinkin jäähdyttävät tilaa, jos tilan lämpötilaa halutaan laskea. Usein suunnittelutyössä puhutaan lämpökuormasta, vaikka tarkoitetaan jäähdytyskuormaa. Tarvittava jäähdytysteho jakautuu tuntuvaan sekä latenttiin jäähdytystehoon. (Aittomäki, 2012. 322-324)

Tuntuvan jäähdytystehon tarve saadaan laskettua kaavalla,

$$\varphi_{tuntuva} = V_i \rho_i c_{pi} (T_s - T_t)$$

iossa,

$\varphi_{tuntuva}$ on kokonaisjäähdytystehon tarve [kW]

V_i on tuloilman tilavuusvirta [m^3/s]

ρ_i on ilman tiheys [kg/m^3]

c_{pi} on ilman lämpökapasiteetti vakio paineessa [kJ/kg]

$(T_s - T_t)$ on sisä- ja tuloilman lämpötilat [K]

Kaavaa käyttäen saadaan laskettua tuntuvan jäähdytystehon tarve tilaan, jos tuloilma ei ole lämpötilaltaan sama kuin tilan tavoiteltu lämpötila. (Sandberg, 2014. 425)

Latentin jäähdystystehon, eli kosteuden aiheuttaman lämpökuorman poistoon,

$$\varphi_{latentti} = \sum m_v I_h$$

iossa,

$\varphi_{latentti}$	on kosteuskuormasta johtuva jäähdystystehon tarve [kW]
m_v	on tilaan tulevan kosteuden massavirta [kg/s]
I_h	on veden höyrystymispaine [kJ/kg]

Kosteuden massavirraksi saadaan viitesuhde, ISO-7547 standardin määrittelemällä ihmisen uloshengityksellä tilaan aiheuttama kosteuskuormituksella, 50 grammaa vettä tunnissa, huoneolosuhteissa +23°C / 50% RH. Koneiden, laitteiden ja muiden latenttia kuormaa tilaan tuovien yhteisvaikutus pitää arvioida erikseen, sekä sisällyttää kokonaismassavirtaan. (Sandberg, 2014. 425)

Ilmanvaihdon aiheuttamaa latenttia kuormaa saadaan arvioitua,

$$\varphi_{ilma} = V_i \rho_i c_{pi} (h_s - h_t)$$

iossa,

φ_{ilma}	on kokonaisjäähdystystehon tarve [kW]
V_i	on tuloilman tilavuusvirta [m ³ /s]
ρ_i	on ilman tiheys [kg/m ³]
c_{pi}	on ilman lämpökapasiteetti vakio paineessa [kJ/kg]
$(h_s - h_t)$	on sisä- ja tuloilman entalpiat [kJ/kg]

Kaavalla saadaan laskettua ilmanvaihdon aiheuttama jäähdystystehon tarve. Tämä laskenta on tarpeen vain silloin, jos tilaan ohjataan esikäsittelemätöntä ilmaa tai esikäsitellyn ja lämpöteknisesti tavoitellun sisäilman entalpioissa on eroa. (Sandberg, 2014. 425)

Tilan jäähdytystehon tarve muodostuu näin sisäisten- ja ulkoisten lämpökuormien summasta, sekä tilaan ohjatun ilman termisistä ominaisuuksista. Näistä arvoista saadaan kokonaisjäähdytyskuormitus, joka on käänteisesti jäähdytysteho, joilla tilan lämpötekniiset ominaisuudet pysyvät määräysten sekä vaatimuksien tasolla. Laskelmat tehdään aina huippukuormitus tilanteen mukaan, jolloin ulkoiset- että sisäiset lämpökuormitukset ovat tilaan suhteen maksimaaliset. (ISO-7547. 2018.)

4 FAN COIL -UNIT

Työn pääkohteena olevaa FCU yksikköä käytetään jo laajalti laivoissa ja rakennuksissa tilojen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen. Laivoissa hyttien jäähdytyksestä on käytetty FCU yksiköitä jo yli 20 vuoden ajan, mutta yleisiin- ja teknisiin tiloihin laitteet eivät ole yleistyneet ennen vuotta 2008 STX Turun telakalta valmistuneen aluksen yhteydessä. (Laine 2019.)

4.1 Toimintaperiaate

Yksinkertaisimmillaan FCU yksiköissä on puhallin moottoreineen, jäähdytyspatteri, ilmansuodattimet, kondenssivesi- ja sähköliitännät. Toiminta perustuu vedenjäähdytyslaitteiston jäähdyttämän liuoksen kiertoon jäähdytyspatterissa, jonka lävitse puhallin kierättää ilmaa. Tehonsäätöön käytetään venttiileitä, joilla ohjataan liuoksen tilavuusvirtaa patterissa sekä puhaltimen nopeutta säätelemällä. Laivoissa jäähdytyspatterille ohjattavan liuoksen lämpötilataso on yleensä +7 °C / +12 °C, mutta suurempaa lämpötilan muutosta voidaan käyttää, jos se järjestelmän kannalta on kannattavaa.

4.2 Käyttökokemukset

FCU yksiköitä on käytetty hyttien jäähdytykseen ja lämmitykseen noin 20 vuoden ajan. Hyttien jäähdyttämisen etuina FCU yksiköillä on tasainen jäähdytysteho sekä ilmanvaihtokanavoinnin määrän väheneminen. Nykyaikainen hyttiä palveleva FCU yksikkö liitetään suoraan tuloilma kanavaan, jolloin pelkällä tuloilman käsittelyllä ja sen standardin mukaisella jakelulla hyttiin saadaan määräysten mukainen ilmanvaihtokerroin saavutettua. Matkustajien mieltymysten mukaan hyttikohtaisella termostaatilla voi säätää ilmastoinnin lämpötilaa sopivaksi, jolloin FCU yksikkö (kuva 3.) kierrättää ilmaa jäähdyttäen sitä samalla. Vaste säätöön on välitön. Energiasäästöä saadaan automaatiota lisäämällä hyttikohtaiseen ilmanvaihtoon jolloin, hyttistä poistuttaessa tai ikkunan avatessa ilmastoinnin määrää saadaan pienennettyä.

Yleisten- ja teknisten alueiden jäähdyttämisessä on FCU yksiköiden käyttö yleistynyt 2000-luvun puolessa välissä, jolloin ensimmäiset yksiköt otettiin käyttöön alusten ilmanvaihto järjestelmissä. Suuren jäähdytystehon tarpeen vaatimissa tiloissa, esim. ravintolasalit, yökerhot ja kasinot, saavutetaan tilaan tuotavan ilmapinnan määrän suhteen merkittäviä vähennyksiä FCU yksiköillä. Näin ollen kanavoiteja on vähemmän sekä niiden koot pienenevät, säilyttäen kuitenkin määräysten vaatiman ilmanvaihtokertoimen. (Laine, 2019; Bergman, 2019.)



Kuva 3. Fan coil -unit Lähde Koja Oy

FCU-yksiköiden käytön etuna on myös jäähdytysenergian siirron tehokkuus, koska liuoksilla, joita jäähdytyspattereissa kierrätetään, on ominaislämpökapasiteetti vähintään nelinkertaisesti parempi kuin ilmalla. (Taulukot, 2020.)

FCU yksiköihin liitetyllä automaatiolla saadaan tilaa jäähdytettyä silloin, kun lämpökuorma ylittää tuloilman jäähdytystehon. Esimerkkinä käytetyssä ravintolassa ei todennäköisesti ole täyttä lämpökuormitusta kuin 2-3 kertaa päivässä. Yö aikaan käyttämättömien tilojen ilmanvaihto ja jäähdytys voidaan kytkeä minimiin.

5 ENERGIATALOUDELLINEN VERTAILU

Tässä työssä vertaillaan tilojen jäähdytykseen kuluvan energian määrää keskitetyn, välillisen järjestelmän avulla, sekä FCU yksiköillä tuettua, edellä mainittua järjestelmää.

Vertailu tehdään aluksen 400-paikkaiseen pääravintolaan. Olosuhteet tapauksessa on, ulkolämpötila +35 °C / 80%RH ja tavoiteltu sisälämpötila 23 °C / 50%RH.

5.1 Tulokset

Aluksen pääravintola on 400 paikkainen ruokasali. Tilaan tehtävät lämpökuormalaskelmat (kuva 4.) ISO-7547 standardin mukaisesti osoittavat, että tilaan kohdistuu 103 kW yhteenlaskettua lämpökuormaa. Tämän lämpökuorman tasaamiseksi tarvitaan vastaavasti saman verran jäähdytystehoa.

SPACE	SPACE PCS	DECK	FRAMES	SPACE TEMP COOLING						SPACE TEMP HEATING																																						
				23 °C						22 °C																																						
ADJOINING SPACE	PCS	LOAD KEY	DIMENSIONS [m] [m]	AREA [m²]	T _o [°C]	T _d [°C]	Q _s [kW]	Q _l [kW]	Q _t [kW]	T _o [°C]	T _d [°C]	Q _w [kW]																																				
Main Restaurant 1 PS	1	5	68-116																																													
Deck over	1			0,0	35	12	0,000		0,000	-5	27	0,000																																				
Deck under	2			55,0	35	12	0,462		0,462	0	22	0,847																																				
Outboard bulkhead	3			102,0	35	12	0,734		0,734	-5	27	1,652																																				
Forward bulkhead	4			0,0	35	12	0,000		0,000	-5	27	0,000																																				
After bulkhead	5			0,0	35	12	0,000		0,000	-5	27	0,000																																				
Inboard bulkhead	6			0,0	35	12	0,000		0,000	0	22	0,000																																				
windows	0		0,00 0,00	7,9	35	12	0,105		0,105	-5	27	0,235																																				
lights	7			611,0			6,110		6,110																																							
equipment	8						3,000		3,000																																							
personnel	385	9					32,725	57,750	90,475																																							
solar radiation, deck over				0,0		32	0,000		0,000																																							
solar radiation, bulkhead				102,0		12	0,734		0,734																																							
solar radiation, windows				7,9			1,568		1,568																																							
<p>Air quantity of cooling mode 3,749 m³/s</p> <p>Air quantity of heating mode 0,226 m³/s</p> <p>Minimum rate of change in room (1/h) 8</p> <p>Minimum fresh air by person 0,007 m³/s</p> <p>Number of persons 385</p> <p>Extra information: Lighting 10 W/m² Estimated device load 3 kW</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>KEY</th> <th>SYMBOLS</th> <th>SUMMARY</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1 = Deck over</td> <td>Q_s = Heat load, sensible</td> <td>Area, m² 611,0 m²</td> </tr> <tr> <td>2 = Deck under</td> <td>Q_l = Heat load, latent</td> <td>Height 2,4 m</td> </tr> <tr> <td>3 = Outboard bulkhead</td> <td>Q_t = Heat load, total</td> <td>Volume 1466,4 m³</td> </tr> <tr> <td>4 = Forward bulkhead</td> <td>Q_w = Heat load, winter</td> <td>R of C * 9,2 1/h</td> </tr> <tr> <td>5 = After bulkhead</td> <td>T_d = Temperature differences</td> <td>Sum, Q_s 45,439 kW</td> </tr> <tr> <td>6 = Inboard bulkhead</td> <td>T_o = Temp of adjoining space or outside</td> <td>Sum, Q_l 57,750 kW</td> </tr> <tr> <td>7 = Lights</td> <td>q_v = Air quantity</td> <td>Sum, Q_t 103,189 kW</td> </tr> <tr> <td>8 = Equipment</td> <td></td> <td>Sum, Q_w 2,735 kW</td> </tr> <tr> <td>9 = Personnel</td> <td></td> <td>q_v * 3,749 m³/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>q_{v,winter} 2,695 m³/s</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Room determinant Heating load</td> </tr> </tbody> </table> <p>* In value taken in to count the highest of following: Heatload / Minimum rate of changed / Minimum fresh air per person</p>													KEY	SYMBOLS	SUMMARY	1 = Deck over	Q _s = Heat load, sensible	Area, m² 611,0 m²	2 = Deck under	Q _l = Heat load, latent	Height 2,4 m	3 = Outboard bulkhead	Q _t = Heat load, total	Volume 1466,4 m³	4 = Forward bulkhead	Q _w = Heat load, winter	R of C * 9,2 1/h	5 = After bulkhead	T _d = Temperature differences	Sum, Q _s 45,439 kW	6 = Inboard bulkhead	T _o = Temp of adjoining space or outside	Sum, Q _l 57,750 kW	7 = Lights	q _v = Air quantity	Sum, Q _t 103,189 kW	8 = Equipment		Sum, Q _w 2,735 kW	9 = Personnel		q _v * 3,749 m³/s			q _{v,winter} 2,695 m³/s			Room determinant Heating load
KEY	SYMBOLS	SUMMARY																																														
1 = Deck over	Q _s = Heat load, sensible	Area, m² 611,0 m²																																														
2 = Deck under	Q _l = Heat load, latent	Height 2,4 m																																														
3 = Outboard bulkhead	Q _t = Heat load, total	Volume 1466,4 m³																																														
4 = Forward bulkhead	Q _w = Heat load, winter	R of C * 9,2 1/h																																														
5 = After bulkhead	T _d = Temperature differences	Sum, Q _s 45,439 kW																																														
6 = Inboard bulkhead	T _o = Temp of adjoining space or outside	Sum, Q _l 57,750 kW																																														
7 = Lights	q _v = Air quantity	Sum, Q _t 103,189 kW																																														
8 = Equipment		Sum, Q _w 2,735 kW																																														
9 = Personnel		q _v * 3,749 m³/s																																														
		q _{v,winter} 2,695 m³/s																																														
		Room determinant Heating load																																														

Kuva 4. Lämpökuormalaskelma

Osa jäädytysenergiasta tuodaan normaalin ilmanvaihdon kautta, mutta laskelmien mukaan se ei riitä. Taloudellisesti on järkevää tuoda alueelle vain sen verran tuloilmaa, jonka ihmiset tai tilan ilmanvaihto kerroin määrittää. Suunnittelu vaiheessa tila oletetaan stabiiliksi, jolloin tilaan kohdistuva lämpökuormitus pysyy samana. Suunnittelun alussa tilassa vallitsee lämpötekniisesti suunnitellut olot. Tällöin voidaan mielikuvituksellisesti lämpökuorman yhteisvaikutus olettaa yhdeksi saunan kiukaaksi, joka lämmittää tilaa kuormitus laskelmien mukaisesti. Stabiilissa tilanteessa voidaan aloittaa tilan jäädyttämiseen tarvittavien ilmamäärien laskelmat.

Tilan suunnitellut lämpötekniiset arvot ovat 23 C° $50\%_{\text{RH}}$.

Raitista ilmaa säädösten mukaan tarvitaan $2,695\text{m}^3/\text{s}$, joka on henkilölukumäärään suhteutettu tuloilman määrä. ISO-7547 mukaan tuloilman lämpötilaero saa olla maksimissaan 10 C° verrattuna suunniteltuun huoneilmaan. Tilaan voidaan siis johtaa 13 asteista tuloilmaa, mutta taloudellisesti se voi olla kannattamatonta, kun oletuksena on käyttää FCU yksikköjä apuna tilan jäädytyksessä. Ilman käsittelyprosessi jakelu kelpoiseksi ulkoilmasta on energiatehokkuuden kannalta tehottomampaa kuin jo käsitellyn ilman jäädytys. Asteen tai kahden muutos tuloilman lämpötilassa vaatii enemmän energiaa kuin ilman uudelleen jäädytys.

Käsitellyn raitisilman tarpeen perusteella ($2,695$) [m^3/s], voidaan interpoloida AHU-yksikön tuottama jäädytysteho tälle ilmamäärälle.

$(309\text{ [kW]} / 7,48\text{ [m}^3/\text{s]}) * 2,695\text{ [m}^3/\text{s]} = 111\text{ [kW]}$. Laite valmistajan antamalla kuormituksen suunnittelukertoimella $k=0,7$ saadaan tulokseksi noin 85 [kW] jäädytystehoa.

Jäädytystehon ja jaettavan ilmamäärän suhteella saadaan selvitettyä tuloilman lämpötekniiset ominaisuudet, entalpien määrän, joka sitoo itseensä tarvittavan jäädytysenergian.

Tilan tuloilman lämpötilaksi suunnitellaan 24 C° $98\%_{\text{RH}}$, jolloin tulo ja vallitsevan huoneilman välinen entalpiaero on $25,5$. Tilaan tuotava tuloilma, sisältää jäädytys tehoa 82kW .

$(P\text{ [kW]} = q\text{ [m}^3/\text{s]} * \Delta i\text{ [kJ/kg]} * 1,2\text{ [kg/m}^3])$

Alueen jätto lämpökuormaksi jää 21kW ja tätä kuormaa poistaman käytetään FCU yksiköitä, jotka kierrättää ja samalla jäähdyttää esijäähdytettyä ilmassaa. ISO-7547 tuloilman lämpötilaero säännön mukaan lasketaan kierrätettävän ilman määrä hyödyntäen koko säädöksen sallima kapasiteetti, jolloin lamellipakan läpivirtaava tuloilman lämpötila on 13 °C 0%RH, entalpian ollessa 13,1.

$$P \text{ [kW]} / (\Delta i \text{ [kJ/kg]} * 1,2[\text{kg/m}^3]) = q \text{ [m}^3/\text{s]} = \underline{1.054 \text{ m}^3/\text{s}}$$

Ilmamassojen, 24°C ja 13°C sekoituessa, päästään lämpötilaa laskemaan jopa suunniteltua 23 °C astetta alemmas 20 °C asteeseen, täydellä kuormituksella. Lämpötilan tunnistava anturi reagoi muutokseen nopeasti ja näin voidaan säätää FCU:n toimintatehoa. FCU:n tulo- ja paluuilman asemoinnilla, on suuri merkitys alueen lämpöviihtyvyyteen.

Suhteellisen ilmankosteuden määrä laskee käytännössä 5 prosenttiyksikköä, yhden celsiusasteen muutoksena lämpötilassa, ilmavirran kulkiessa FCU yksikön läpi. Tarkasteltavassa tapauksessa lämpötilan muutos on 11 celsiusastetta. Näillä tuloksilla pääsemme alueen maksimi lämpökuormituksella lähelle tavoiteltua 23 C° 50%RH suunnittelu ominaisuuksia. Pelkällä tilan tuloilmajäähdytyksellä 23 C° 50%RH, 2,695 [m³/s], ilmassan tarvitsee sisältää kokotilan jäähdyttämiseen tarvittava energia, jotta olemassa olevat lämpökuormat saadaan tasattua. Tällöin tilaan tuodun ilman entalpia on 45,2 joka sisältää 146 [kW] jäähdytysenergiaa. Tilaan johdetaan siis turhaan 43 [kW] jäähdytysenergiaa.

FCU yksiköiden käytön etuna on myös jäähdytysenergian siirron tehokkuus koska, liuoksilla, joita jäähdytyspattereissa kierrätetään, on ominaislämpökapasiteetti vähintään nelinkertaisesti parempi kuin ilmalla.

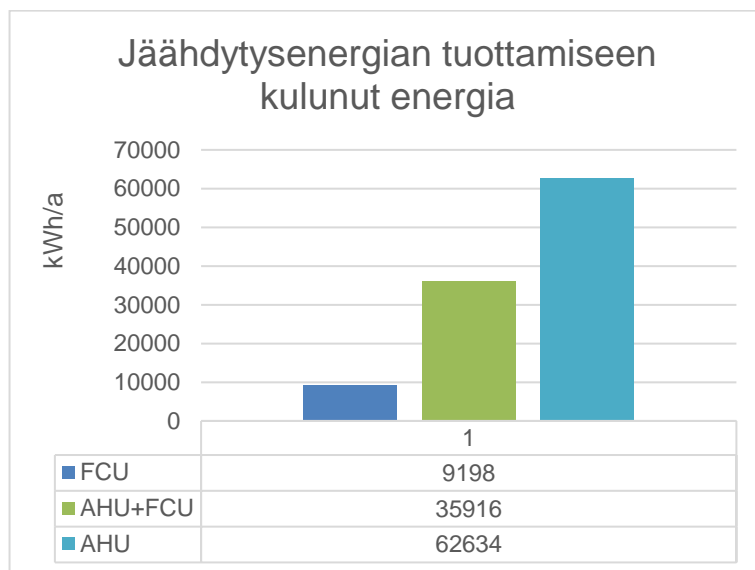
FCU yksiköihin liitetyllä automaatiolla saadaan tilaa jäähdytettyä silloin, kun lämpökuorma ylittää tuloilman jäähdytystehon. Esimerkkinä käytetyssä ravintolassa ei todennäköisesti ole täyttä lämpökuormitusta kuin 2-3 kertaa päivässä. Yö aikaan käyttämättömien tilojen ilmanvaihto ja jäähdytys voidaan kytkeä minimiin.

5.2 Päätelmät

Työn edetessä havaittiin, että FCU- yksiköt ovat verrattavissa perinteiseen, keskitetyn jäähdytysjärjestelmän tuloilma pisteeseen ja näin ollen eivät itsessään säästä energiaa missään muodossa. Jäähdytysenergia tuotetaan muualla ja FCU -yksikkö toimii vain jakeluyksikkönä, muuntaessaan liuokseen sidotun jäähdytysenergian huoneilmaan.

Jäähdytysenergian määrä pysyy muuttumattomana energian säilymislain mukaan. Jäähdytysenergian tuotanto- ja jakelutavalla saadaan aikaan mahdollisia energiatehokkuuteen vaikuttavia säästöjä. Kohdassa 5.1, havaittiin, että 43[kW] ylimääräisen jäähdytysenergian tuominen alueelle on turhaa, koska alueen lämpökuorman kumoamiseen riittää vähäisempi määrä. Tämä määrä ylimääräistä jäähdytysenergia osoittaa FCU yksiköillä tuetussa keskitetyssä jäähdytysjärjestelmässä olevan energiansäästö potentiaalin, verrattuna tavalliseen keskitettyyn jäähdytysjärjestelmään.

Kohdissa 2.3 ja 2.4 todetun jäähdytysenergian tuotanto vaiheessa saavutetaan tämän työn tarkastelun kannalta suurin energiansäästöpotentiaali. Ylimääräisen jäähdytysenergian tuottaminen karkeasti arvioituna, $43[\text{kW}] / 5[\text{COP}] = 8,6[\text{kW}]$ syötettyä energiaa. Vaikka kokonaismäärältään ylimääräinen energiankulutus on pientä, se kertaantuu koko aluksen elinkaaren ajan. Vuoden ajan, jos täyttä kuormitusta on kolmesti päivässä, kahdentunnin sykleissä saadaan teoreettisesti $18\,800[\text{kWh}]$ energiansäästöä aikaiseksi. $(3 \cdot 2\text{h} \cdot 365\text{d} \cdot 8,6\text{kW})$ (kuva 5.)



Kuva 5. Jäähdytysenergian tuottamiseen kulunut energia

6 YHTEENVETO

Laivojen ilmanvaihto on monimutkainen sekä osiensa summana toimiva kokonaisuus. Työssä tehtyyn tarkasteluun FCU-yksiköillä tuetusta jäähdytysjärjestelmästä voidaan todeta, että sillä saavutetaan jäähdytysenergian tuotannossa säästöjä, koska energian väliaineena toimii liuos, joka sitoo itseensä energiaa huomattavasti paremmin kuin ilma. Energiasäästöä syntyy myös siten, että FCU-yksikkö kierrättää tilassa olevaa, esijäähdytettyä, pienellä entalpia- ja lämpötila erolla olevaa ilmaa ja näin ylläpitää suunniteltuja lämpötekniisiä ominaisuuksia.

Pienemmällä tuloilman jakelun määrällä yhdelle alueelle voidaan käyttää pienempiä AHU-yksiköitä tai alistaa saman yksikön palveltavaksi useampia alueita. Referenssitilaa palvelevan AHU-yksikön maksimikapasiteetti ylittyisi jo pelkästään tarkastelun alla olevan tilan perinteisellä tavalla toteutetun ilmastoinnin kanssa. Kohteessa kuitenkin kyseinen yksikkö on alistettu kolmelle eri alueelle. AHU-yksiköiden lämmöntalteenoton avulla saadaan raakailman kuivaamiseen tarvittavaa energiaa tiloihin kohdistuvasta lämpökuormasta.

Työ täyttää tavoitteen ja osoittaa FCU-yksiköillä tuetun jäähdytysjärjestelmän energiansäästöpotentiaalin verrattuna keskitetyn jäähdytysjärjestelmään. Työn tuloksilla voidaan osoittaa varustamoille, että alusten korjausrakentamisessa FCU-järjestelmän lisääminen perinteisen jäähdytysjärjestelmän rinnalle on kannattavaa käyttökustannusten perusteella. Erityisesti laivassa alueille, jossa lämpökuormat pysyvät stabiileina ja jäähdytyksen tarve on suuri, mm. sähköhuoneen ja tekniset tilat.

LÄHTEET

Aittomäki, A. 2012. Kylmätekniikka,

Bergmann, H. Haastattelu 27.2.2019 MV-Werften GmbH, Stralsund

DNVGL 2020. Viitattu 28.2.2020 http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/maritimerules/gl_i-1-21_e.pdf

Elomatic Oy 2020. Viitattu 28.2.2020 www.elomatic.com

IMO 2020. Viitattu 28.2.2020 [http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/IMO-Conventions%20\(copies\)/SOLAS.pdf](http://www.mar.ist.utl.pt/mventura/Projecto-Navios-I/IMO-Conventions%20(copies)/SOLAS.pdf)

ISO-7547 Standardi

ISO-7730 Standardi

Koja Oy 2018. Viitattu 28.2.2020 <https://koja.materiaali.fi/folder/kiinteistot/ilmanvaihto/future-s-ilmanvaihtokoneet/21>

Laine, A. Haastattelu 20.4.2018 Elomatic Oy, Turku

Ledsmagazine 2020. Viitattu 20.2.2019 <http://www.ledsmagazine.com/articles/2005/05/fact-or-fiction-leds-don-t-produce-heat.html>

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus

Seppänen, O. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto

Taulukot 2020. Viitattu 28.2.2020

https://www.taulukot.com/fysiikka/mekaniikka_termodynamiikka