

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

School of Energy Systems

Energiatekniikka

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Modernien risteilyalusten energiajärjestelmät

Energy systems of modern cruise ships

Työn ohjaaja ja tarkastaja: Antti Uusitalo

Lappeenranta 21.05.2019

Henry Vesalainen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Henry Vesalainen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Antti Uusitalo

Kandidaatintyö 2019

35 sivua, 22 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: Dieselsähköinen propulsio, Dual-fuel-moottorit, Energiatehokkuus, Energiavarastot, Rikkipesuri, Risteilyalus

Tässä työssä käsitellään risteilyalusten energiajärjestelmiä kirjallisuuden avulla. Työn tavoitteena on selvittää päästösäädöksiä ja parantuneen energiategokkuusteknologian vaikutus nykyivän sekä tulevaisuuden risteilyalusten energiajärjestelmiin.

Työn alkupuolella perehdytään tarkemmin merenkulun päästörajoituksiin ja energiategokkuussäädöksiin. Tältä pohjalta on helpompi hahmottaa sitä, mistä ollaan tultu, minkä vuoksi ja mihin ollaan menossa. Päästörajoitukset tulevat vaikuttamaan yhä enenevissä määrin päästöjärjestelmien ja vaihtoehtoisten polttoaineiden markkinapohjaisen kysynnän kasvuun. Etenkin tiukemmilla päästörajoitusalueilla risteilevillä aluksilla on päästörajoitusten saavuttamiseksi käytettävä joko erilaisia päästöjärjestelmiä tai vaihtoehtoisesti poltettava kalliimpaa vähärikistä polttoainetta perinteisen raskaan polttoöljyn sijasta. Nesteytetty maakaasu nähdään alalla erittäin potentiaalisena vaihtoehtona raskaalle polttoöljylle, koska sen polttaminen rasittaa vähemmän ympäristöä. Isoin haaste nesteytetyn maakaasun yleistymiselle on se, että jakeluverkko etenkin globaalisti on vielä varsin keskeneräinen.

Viimeisten vuosikymmenien aikana risteilyalusten energiategokkuus on parantunut merkittävästi. Asian perimmäistä syytä lähdettiin tarkastelemaan tutustumalla risteilyalusten propulsiovoiman, lämmön ja sähkön tuotantoon. Tutkimuksessa todettiin, että yhä tehokkaampi savukaasujen mukana poistuvan exergian hyödyntäminen sekä keskitetty sähköntuotto ovat vaikuttaneet merkittävimmin kokonaishyötysuhteen paranemiseen. Seuraava isompi askel energiategokkuuden parantamisessa tulevaisuudessa tulee olemaan lämpövarastojen yleistyminen. Sähkövarastojen suhteen saamme odottaa vielä teknologian kehitystä, jotta niiden käyttäminen on taloudellisesti kannattavaa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Lyhenneluettelo

1 JOHDANTO	6
2 RISTEILY- JA LAIVALIIKENTEEEN NYKYTILA	7
2.1 Päästörajoitukset.....	7
2.2 LNG - Nesteytetty maakaasu	9
2.3 EEDI ja SEEMP	11
3 ENERGIAJÄRJESTELMÄT	12
3.1 Operatiivinen toiminta.....	13
3.2 Energian tuottaminen ja moottorit.....	14
3.3 Sähköjärjestelmät	18
3.4 Lämmön talteenotto ja tuotanto.....	20
3.5 Energiavarastot, akkuteknologia ja hukkalämmön muuntaminen sähköksi	23
4 PÄÄSTÖJÄRJESTELMÄT	28
4.1 Rikkipesurit	29
4.2 Typpioksidit ja SCR-tekniikka.....	31
4.3 Päästöhyödyt	32
5 YHTEENVETO	33
LÄHDELUETTELO	36

LYHENNELUETTELO

CO ₂	Hiilidioksidi (Carbon dioxide)
EEDI	Energiatehokkuutta mittaava suunnitteluindeksi (Energy Efficiency Design Index)
EEOI	Vapaaehtoisuuteen perustuva laivan energiatehokkuutta käytön aikana kuvaava indikaattori (Energy Efficiency Operational Indicator)
EGB	Savukaasukattila (Exhaust Gas Boiler)
EGR	Pakokaasun takaisinkierätys (Exhaust Gas Recirculation)
EU	Euroopan Union (European Union)
EU15-maat	Belgia, Espanja, Hollanti, Iso-Britannia, Italia, Itävalta, Irlanti, Kreikka, Luxemburg, Portugali, Ranska, Ruotsi, Saksa, Suomi, Tanska
HFO	Raskas polttoöljy (Heavy Fuel Oil)
HRSG	Höyryn tuottoon käytettävä lämmöntalteenottojärjestelmä (A Heat Recovery Steam Generator)
HTHR	Kuuman veden lämmöntalteenotto järjestelmä (Hot Water Heat Recovery)
HVAC	LVI eli lämmitys, vesi ja ilmastointi (Heat, Ventilation and Air-Conditioning)
IGU	Kansainvälinen kaasuliitto (International Gas Union)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
LBG	Nesteytetty biokaasu (Liquefied Bio Gas)
LNG	Nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
MARPOL	Kansainvälinen yleissopimus merenkulun alusten aiheuttamien saasteiden ehkäisemiseksi. (The International Convention for The Prevention of Pollution from Ships)
MDO	Meridiesel (Marine Diesel Oil)
MEPC	Meriympäristön suojelukomitea (The Marine Environment Protection Committee)
MGO	Merikaasuöljy (Marine Gasoil)
NECA	Typpipäästöjen kontrollointialue (Nitrogen Emission Control Area)

NO _x	Typen oksidit (Nitrogen Oxides)
ORC	Organic Rankine Cycle
PM	Pienhiukkaset (Particulate Matter)
SCR	Selektiivinen katalyyttinen pelkistys (Selective catalytic reduction)
SEEMP	Laivan energiatehokkuuden hallintasuunnitelma (Ship Energy Efficiency Management Plan)
SECA	Rikkipäästöjen kontrollointialue (Sulphur Emission Control Area)
SO _x	Rikin oksidit (Sulphur Oxides)
Tier I, II, III	IMO:n asettama kolmiportainen ohjelma, jonka tavoitteena on pienentää meriliikenteen aiheuttamia typpipäästöjä.

1 JOHDANTO

Risteilylomailu virkistyskäytössä on ollut ihmisten suosimaa jo useiden vuosisatojen ajan, mutta vasta viimeisten vuosikymmenten aikana ollaan herätty kyseenalaistamaan sen aiheuttamaa kuormaa ympäristölle. Monella eri liikennesektorilla eletäänkin murroksen aikaa siitä syystä, että kansainvälinen huoli ilmaston lämpenemisestä on suuri. Tuleva, jokseenkin jo käynnissä oleva merenkulun murros tulee muuttamaan merkittävästi liikennöivien risteilyalusten energiajärjestelmien rakennetta energiatehokkaampaan ja päästötömämpään suuntaan.

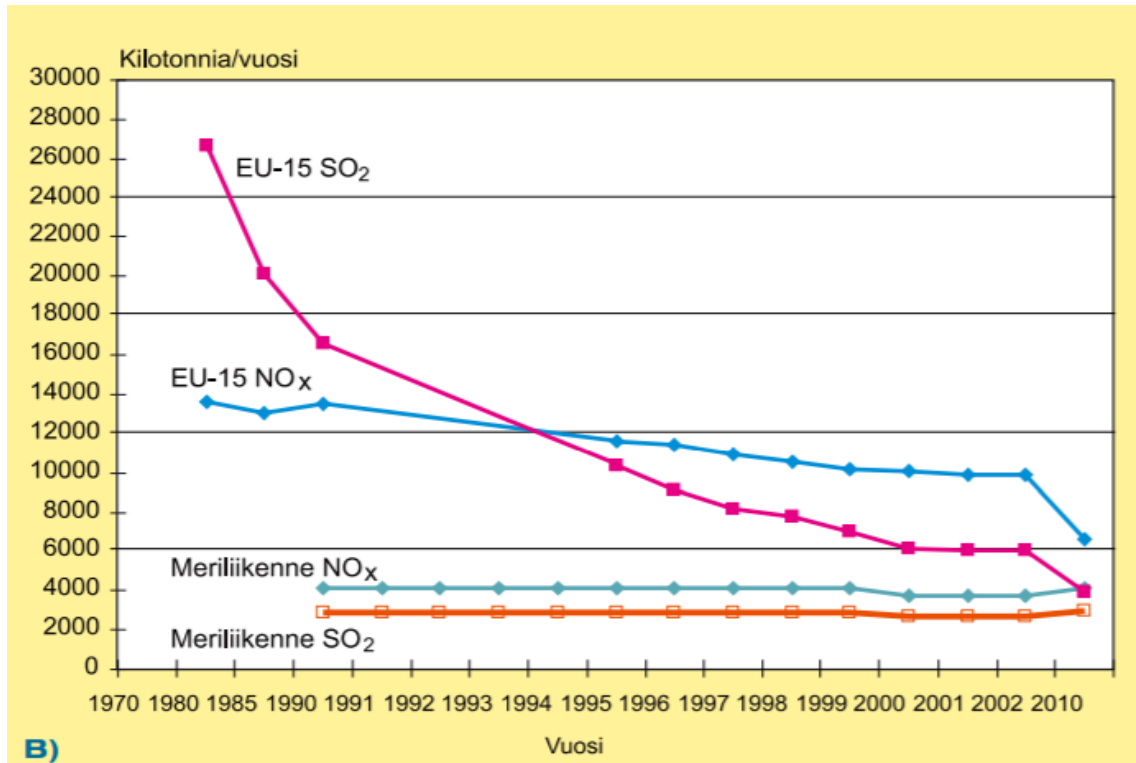
Perinteisesti risteily- ja laivaliikenteen pääsääntöisenä polttoaineena on toiminut raskaspolttoöljy, jonka polttaminen on ympäristölle hyvin kuormittavaa. Laivaliikenteen päästöjä tullaan tulevaisuudessa rajoittamaan yhä enemmän alueellisesti sekä kansainvälisesti. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO (International Maritime Organization) onkin asettanut tavoitteeksi, että vuoden 2008 päästötasosta saataisiin vähennettyä ainakin 50 prosenttia vuoteen 2050 mennessä ja kuluvan vuosisadan loppuun mennessä päästäisiin nolla päästöihin (IMO 2018a.). Tämä asettaa risteilyliiketoiminnalle erilaisia haasteita matkustajamäärien yhä kasvaessa. Pelkästään siirtyminen raskaasta polttoöljystä esimerkiksi nesteytetyn maakaasun LNG:n (Liquefied Natural Gas) tapaisiin ympäristöä vähemmän kuormittaviin polttoaineisiin ei riitä saavuttamaan tulevaisuudessa IMO:n asettamia tavoitteita. Energiatehokkuuden parantaminen ja päästöjen talteenotto korostuvat mentäessä murrosta yhä pidemmälle. Tämän työn pääpaino on tutustua risteilyalusten nykytilaan ja toimintaan sekä luoda katsaus siihen, minkälaisista energiateknisistä kokonaisuuksista modernit risteilyalukset koostuvat. Näiden pohjalta luodaan katsaus siihen, mihin suuntaan risteilyalukset muuttuvat tulevaisuudessa. Työssä keskitytään risteilyaluksiin, mutta muutakin laivaliikennettä tarkastellaan siinä määrin, mikä on tarpeellista yleisten asioiden ymmärtämisen helpottamiseksi. Risteilyalusten energiajärjestelmät ovat hyvin laaja-alainen kokonaisuus, joten työn laajuuden puitteissa käydään vain oleellisimmat osakokonaisuudet läpi.

2 RISTEILY- JA LAIVALIIKENTEEN NYKYTILA

Raskas polttoöljy HFO (Heavy Fuel Oil) on vakiintunut suuren kokoluokan meriliikenteen eli keskinopea- ja hidaskäyntisten dieselmoottoreiden raaka-aineena, koska sillä on korkea energiatiheys hintaansa nähden. Raskaan polttoöljyn lisäksi jonkin verran risteilyaluksia operoi vaihtoehtoisilla polttoaineilla esimerkiksi kaasulla tai meridieselillä MDO:lla (Marine Diesel Oil). Isoja risteilyaluksia merelle liikuteltaessa tarvitaan merkittäviä määriä energiaa sekä propulsiovoiman tuottoon että muihin oheistoimintoihin, esimerkiksi matkustajien mukavuus- ja viihtyisyystarpeisiin. Liian pitkälle jalostettujen polttoaineiden käyttö ei yksinkertaisesti ole taloudellisesti kannattavaa. Siitä huolimatta, että HFO:n asema on vahvasti vakiintunut, nykypäivän päästörajoitukset ovat tuoneet markkinoille kourallisen vaihtoehtoisia polttoaineita, muun muassa LNG:tä ja vähärikkistä kaasuöljyä MGO:ta (Marine Gasoil). Päästörajoitusten lisäksi IMO on aloittanut 2010-luvulla EEDI-indeksin (Energy Efficiency Design Index) ja SEEMP-ohjelman (Ship Energy Efficiency Management Plan), joiden tarkoitus on ohjata aluksia yhä energiatehokkaampaan suuntaan. Tässä kappaleessa luodaan yleisen ymmärryksen pohjaa siihen mitkä tekijät ovat vaikuttaneet ja vaikuttavat tulevaisuudessa risteilyalusten energiajärjestelmien kehittymiseen. (Hermann ja Prenninger 2003, 1. Repka et al. 2017, 14.)

2.1 Päästörajoitukset

Tähdittäessä ekologisesti puhtaampaan meriliikenteeseen on ensitöiksi alettu rajoittamaan syntyviä rikki- ja typpipäästöjä sekä seuraamaan meriliikenteen hiilidioksidipäästöjä. HFO:n polton yhteydessä syntyvät rikin ja typen oksidit ovat erityisen haitallisia niiden happamoivien ominaisuuksien vuoksi sekä ympäristölle että ihmisten terveydelle (Trafi 2018). Kuvasta 1. näemme, että typen ja rikin oksidien muut päästösektorit ovat olleet viimeisten vuosikymmenien ajan Suomessa rajoitusten kohteena esimerkiksi energiasektorilla. Puolestaan EU:n vanhojen jäsenmaiden eli EU15-maiden meriliikennesektorin typpi- ja rikkipäästöt olivat vakiintuneet menneiden vuosikymmenien ajaksi. Meriliikenteen päästösektorin tärkeimmät komponentit ovat NO_x , SO_x ja CO_2 , siksi suurimmat rajoitukset ja seuranta kohdistuvatkin juuri näihin päästökomponentteihin. Meriliikenteen päästöjen rajoittaminen tuleekin esimerkiksi energiasektoriin verrattaessa vuosikymmeniä perässä. Tämä johtuu osittain siitä, ettei laivaliikenne kuulu EU:n päästökaupan piiriin, mutta tähän on herätty 2010-luvulla ja merenkulun päästöjä on alettu rajoittamaan. (VTT 2004, 156.)

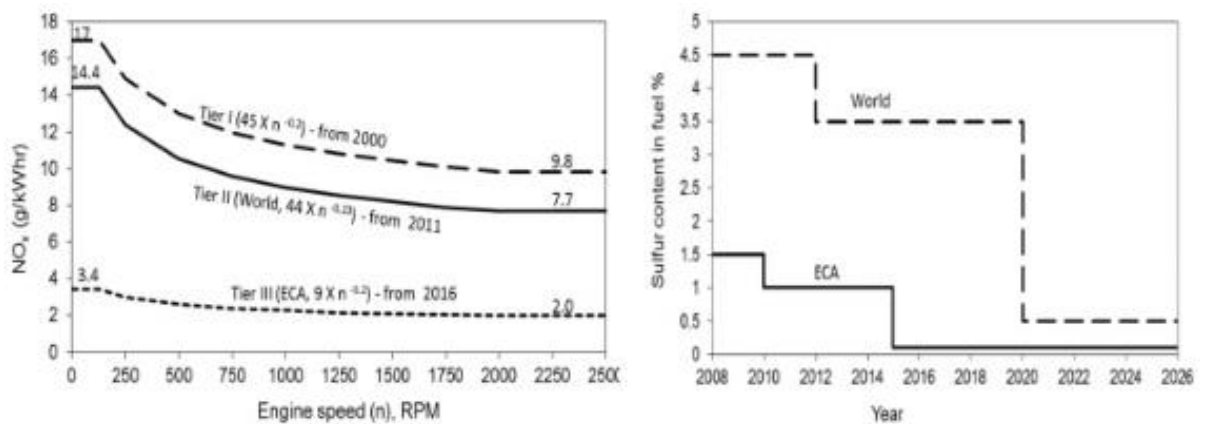


Kuva 1. EU15-maiden sekä Euroopan kansainvälisten merialueiden typpi- ja rikkioksidipäästöt vuosina 1970-2010. (VTT. 2004, 156.)

IMO:n asettamat rajoitukset polttoaineiden rikkipitoisuuksille on säädetty MARPOL:n (The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) 1.7.2010 voimaantulleessa uudistetussa ilmastonuojeluliitteessä. Vuodesta 2012 lähtien sallittu rikkipitoisuus meriliikenteen polttoaineissa on ollut globaalisti 3,5 prosenttia ja se kiristyy vuodesta 2020 alkaen 0,5 prosenttiin, lukuun ottamatta SECA-alueita (Sulphur Emission Control Area), joihin kuuluu mm. Itämeren, Pohjanmeren ja Englannin kanaalin vesialueet. SECA-alueilla sallittu rikkipitoisuus on ollut vuodesta 2015 lähtien 0,1%. Tämän lisäksi monissa Euroopan alueella olevissa suurissa satamissa polttoaineen rikkipitoisuus on rajoitettu yhtä tiukkaan 0,1% rajaan vuodesta 2010 alkaen. Vähä rikkisten polttoaineiden vaihtoehtona on rikkipesureiden käyttö, jotka mahdollistavat edellä mainittua korkeampien rikkipitoisten polttoaineiden, esimerkiksi HFO:n, käytön. (2016/802/EU, L 132/60.)

Tyypin päästöjä rajoitetaan IMO:n toimesta kolmiportaisella Tier-ohjelmalla. Toisen Tier-tason mukaan 1.1.2011 jälkeen rakennettujen alusten typpipäästöjen täytyy olla 20% matalampi kuin ensimmäiseen Tier-tason moottoreissa. Viimeisessä parhaillaan käynnissä olevassa kolmannessa vaiheessa kaikkien alusten kaikilla merialueilla täytyy täyttää ensimmäisen ja toisen vaiheen tasot. Lisäksi NECA-alueilla (Nitrogen Emission Control Area)

1.1.2016 jälkeen rakennettujen alusten tyypipäästöjen täytyy olla 80% Tier-1 tasosta, lukuun ottamatta Itämeren-alueetta, jossa päästötiukennos uusien alusten osalta astuu voimaan 1.1.2021. Typen päästöjen vähentäminen perustuu muun muassa pakokaasujen jälkikäsitteilyyn katalysaattorilla tai perinteisen HFO:n vaihtamiseen esimerkiksi vähäpäästöisempään LNG:hen. Nykyisen sukupolven moottoreilla voidaan saavuttaa Tier I-II tasot täysin moottoriteknisin ratkaisuin, mutta tiukimpaan päästörajaan päästäkseen on alusten käytettävä esimerkiksi SCR-tekniikkaan (Selective catalytic reduction) perustuvaa katalysaattoria. Typen ja rikin rajoitussäädösten ajallinen eteneminen on esitetty kuvassa 2. (Repka et al. 2017, 17. IMO 2017.)



Kuva 2. Typpi- ja rikkipäästörajoitusten kehittyminen. (Ammar ja Seddiek 2017, 167.)

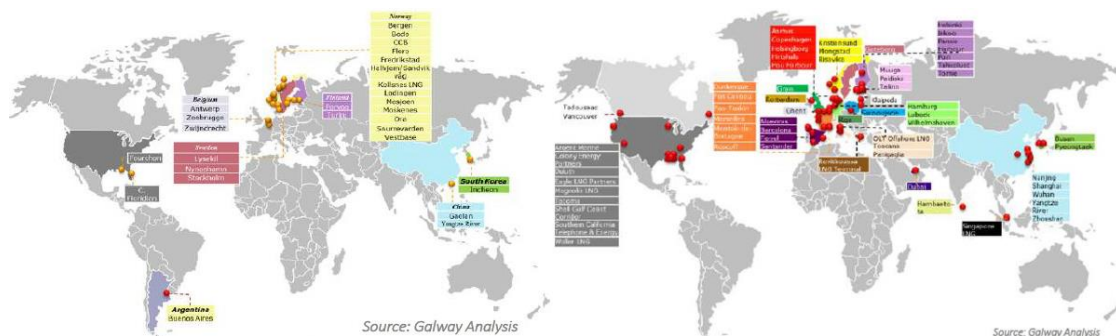
2.2 LNG - Nesteytetty maakaasu

Nesteytetyllä maakaasulla tulee todennäköisin syin olemaan vahva asema meriliikenteen polttoaineena tulevaisuudessa. Nesteytetty maakaasu vie vain kuudessadasosan siitä tilasta, mitä maakaasu kaasumaisena veisi, mutta siitä huolimatta se vie kolmikertaisesti tilaa verrattuna HFO:hon. LNG:n hyödyt nousevat esille, kun tarkastellaan ympäristöystävällisyyttä. Käytettäessä LNG:tä tyypipäästöt pienenevät jopa noin 80-85% ja hiilidioksidipäästöt noin 20-25% verrattaessa HFO:hon. Rikki- ja hiukkaspäästöjä ei synny juuri lainkaan käytettäessä LNG:tä, koska maakaasua nesteytettäessä siitä poistuu rikki, vety, happi, hiilidioksidi ja vesi lähes kokonaan eli LNG:n voidaan karkeasti ajatella koostuvan lähes kokonaan metaanista (Demirbas 2010, 67.). Mikäli LNG saadaan poltettua täydellisesti, on se päästöjen valossa erittäin hyvä polttoaine. Täytyy kuitenkin huomioida, että palamisen ollessa epätäydellistä päätyy palamatonta metaania ilmaan, mikä pienentää näin LNG:stä saatavaa ilmastohyötyä, koska metaani on esimerkiksi noin 20-25 kertaa haitallisempi kas-

vihuonekaasu hiilidioksidiin verrattuna (Balcombe et al. 2018, 76.). Energiatohokkuuden näkökulmasta LNG:tä käyttävät laivamoottorit voidaan rinnastaa perinteisiin raskaista polttoöljyä käyttäviin dieselmoottoreihin. (Mak et al. 2014, 499. Repka et al. 2017, 18-54.)

LNG:n käyttöön liittyvät suurimmat haasteet ovat infrastruktuurisissa seikoissa. Kuljetaminen, maakaasun käsittely nestemäiseksi sekä varastointi vaativat monimutkaista kryo-tekniikkaa. Maakaasun höyrystymispiste on hyvin matala, n.-162°, minkä vuoksi LNG:n varastointi vaatii hyvin matalia lämpötiloja. Täten polttoainelaitteisto on teknisesti monimutkaisempi ja kalliimpi kuin esimerkiksi HFO:n polttoainelaitteisto. (Demirbas 2010, 57-67.).

Kansainvälisen kaasuliiton IGU:n (International Gas Union) mukaan vuonna 2017 kaupattiin 293,1 miljoonaa tonnia LNG:tä, mikä on 12% enemmän kuin vuonna 2016 (International Gas Union 2018, 4.). On toki huomioitava tarkasteltaessa edellä mainittuja lukuja, että LNG:tä käytetään myös muissa sovelluskohteissa. Joka tapauksessa voidaan päätellä LNG-teollisuuden olevan globaalisti merkittävässä kasvussa ja tämä vaikuttaa myös suoraan meriliikenteeseen. Alkuinvestoinnit LNG-terminaaleihin vaativat mittavia taloudellisia panostuksia. Tästä syystä kestää aikansa, että LNG:n jakeluverkko kasvaa laajemmaksi. Terminaalien rakentaminen jokaiseen satamaan ei kumminkaan ole tarpeellista, sillä LNG:llä liikennöiviä aluksia voidaan tankata myös esimerkiksi LNG-säiliöautoista tai LNG-bunkraussäiliöistä. Kuten näemme kuvasta 3, jakeluverkko kehittyä kovaa vauhtia, etenkin Euroopan, Kiinan ja Yhdysvaltojen merialueilla. EU:n tavoite LNG:n suhteen on se, että vuoteen 2025 mennessä jokaisessa Euroopan 139:ssä tärkeimmässä satamassa pystyy suorittamaan LNG:llä toimivan aluksen tankkauksen (European Commission, 2013.). Tavoite on kunnianhimoinen, mutta kuvaa mielestäni erittäin hyvin sitä, kuinka paljon potentiaalia LNG:ssä ajatellaan olevan.



Kuva 3. Nykyiset LNG-terminaalit vasemmalla keltaisilla pisteillä ja oikealla käynnissä olevat terminaali-hankkeet punaisilla pisteillä. (MTCC Latin America, 2018.)

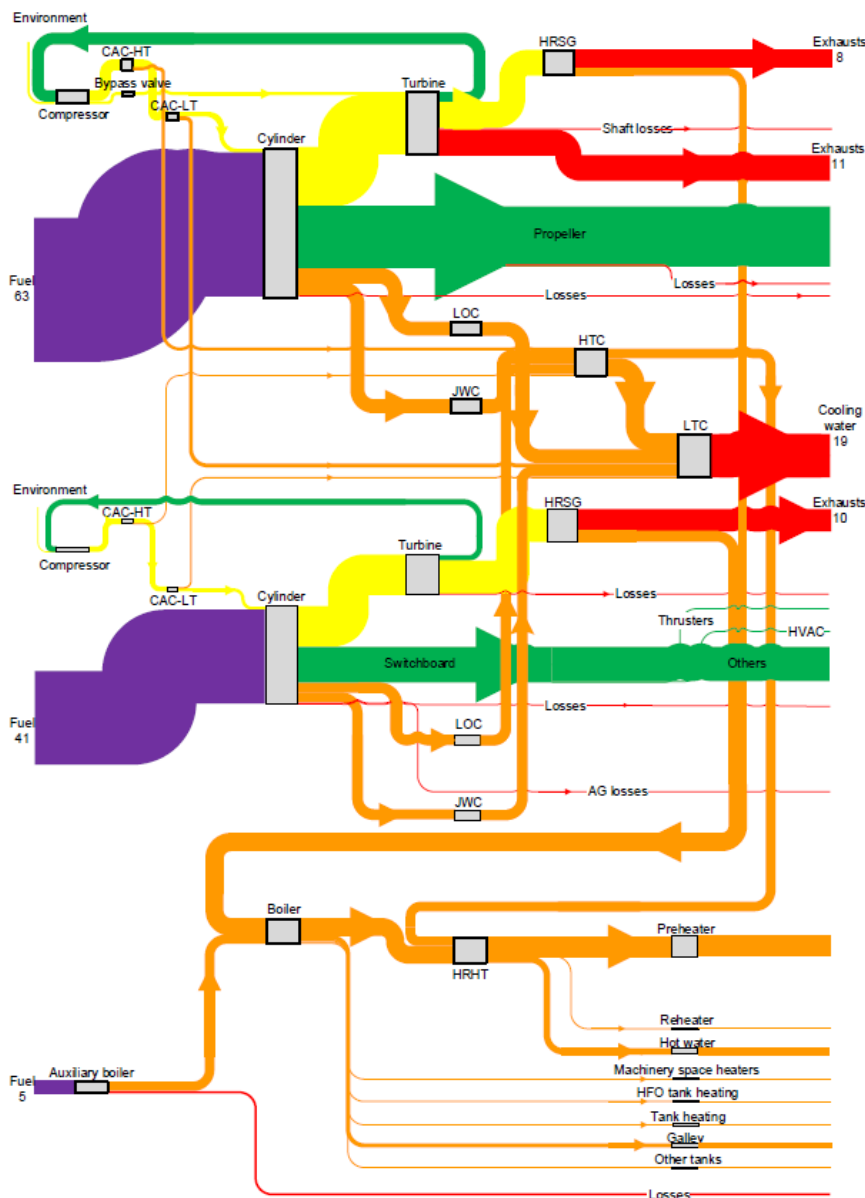
Vaikka alkuinvestoinnit LNG:hen ovat mittavia, ovat ne laajemmassa mittakaavassa tarkasteltuna välttämättömiä tavoiteltaessa päästöttömämpää meriliikennettä. Lisäksi tulevaisuudessa nesteytetyn biokaasun LBG:n (Liquefied Bio Gas) tuotannon lisääntyessä ei tarvitse tehdä uusia infrastruktuurisia tai laivateknisiä investointeja, koska samat ratkaisut soveltuvat niin LNG:lle kuin LBG:lle - ovathan LNG ja LBG molemmat lähes puhdasta metaania. Tämä helpottaa tulevaisuudessa tapahtuvaa portaittaista siirtymistä LNG:stä LBG:hen. Toisin sanoen tulevaisuudessa nestekaasuja voidaan aluksi polttaa jollakin suhteella riippuen siitä, miten LBG:tä on tarjolla. Mikäli joskus päästään siihen tilanteeseen, että LBG:n tuotanto riittää kattamaan kaiken kaasun tarpeen, voidaan siirtyä LNG:stä kokonaan LBG:hen. (Repka et al. 2017, 18.)

2.3 EEDI ja SEEMP

Meriympäristön suojelukomitean MEPC:n (The Marine Environment Protection Committee) 62. kokouksessa heinäkuussa 2011 hyväksyttiin uusien aluksien energiatehokkuutta koskeva EEDI-indeksi sekä laivojen energiatehokkuuden hallintaa koskeva SEEMP-ohjelma kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. EEDI-indeksi pyrkii vaikuttamaan uusien alusten rakentamisessa käytettyihin ratkaisuihin esimerkiksi kannustaen suunnittelemaan energiatehokkaampia pohjan muotoja laivoille tai investoimalla energiatehokkaampiin moottoreihin. SEEMP puolestaan vaikuttaa liikennöiviin aluksiin ja niiden operatiivisiin toimintoihin, esimerkiksi käytettyihin matkanopeuksiin. Näiden kahden säädöksen lisäksi on olemassa vapaaehtoisuuteen perustuva EEOI-indeksi (Energy Efficiency Operational Indicator), jolla voidaan mitata aluksen operatiivista energiatehokkuutta SEEMP:n ohella. Säädösten on tarkoitus luoda pohja tulevaisuudessa IMO:n kansainvälisesti laadittaville sääntelyille, joilla pyritään minimoimaan yhä edelleen CO₂ päästöjä. (IMO 2018b.)

3 ENERGIAJÄRJESTELMÄT

Tässä työssä aiemmin läpikäytyt säädökset ovat luoneet pohjan risteilyalusten energia- ja päästöjärjestelmien nykytilaan. Risteilyalusten energiajärjestelmiä pidetään yleisesti ottaen hyvin monimuotoisina kokonaisuuksina. Suurimmat energiatarpeet jakautuvat lämpö-, sähkö- ja propulsioenergiaan. Näistä lämpö- sekä sähköenergia vievät noin neljänneksen kumpikin ja propulsio noin puolet kokonaisenergian kulutuksesta. Kuvassa 4 on kaavakuva perinteisen risteilyaluksen energiavirroista. (Baldi et al. 2018, 19.)

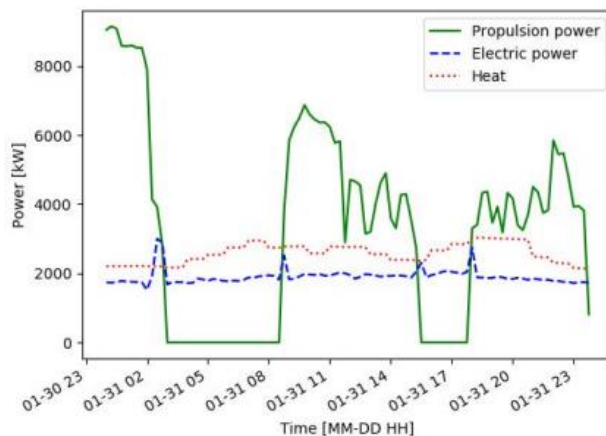


Kuva 4. Perinteisen risteilyaluksen energiavirtakaavio. Violetti kuvaa kemiallista energiaa, vihreä mekaanista/sähköistä energiaa, keltainen savukaasujen exergiaa, oranssi jäähditysvirtojen energiaa ja punainen energiähäviöitä. Luvut kuvaavat yksikköä GWh/vuosi. (Baldi et al. 2018, 19)

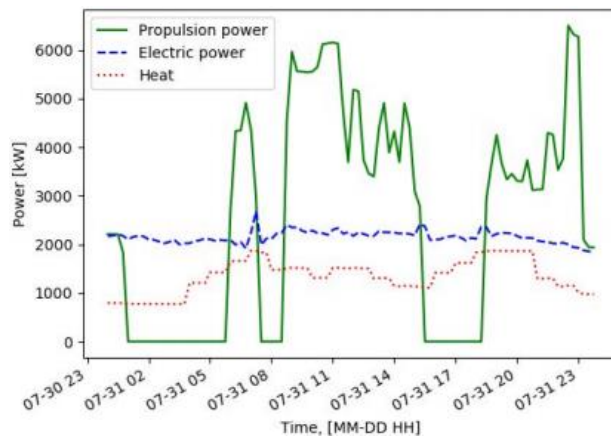
3.1 Operatiivinen toiminta

Kuva 4 kuvaa vuonna 2004 Rauman telakalla rakennetun risteilyaluksen energiavirtoja. Propulsiovoima tuotetaan neljällä dieselmoottorilla, joista pääsääntöisesti kahdella operoidaan samanaikaisesti. Kyseinen kaavakuva pätee hyvin yleisellä tasolla 2000-luvun molemmiin puoliin rakennettuihin risteilyaluksiin, jollaisia merkittävä osa liikennöivistä risteilyaluksista koostuu. (Baldi et al. 2018, 1-19)

Risteilyalusten energiajärjestelmiin omat haasteensa luovat ajallisesti vaihtuvat energiatarpeet sen mukaan, onko risteilijä satamassa vai merellä ja mitä vuoden tai vuorokauden aikaa eletään. Itämeren alueella väliä Tukholma – Maarianhamina risteilevän aluksen energiaosuudet talvella sekä kesällä eri vuorokauden aikoina on esitetty kuvissa 5 ja 6. Kuvista nähdään, että luonnollisesti talvisin lämmitykseen tarvittava energia on suurempi. Kesällä puolestaan on hiukan suurempi sähkön tarve johtuen suuremmasta ilmanvaihdon ja ilmastoinnin tarpeesta. (Baldin et al. 2018, 16.)

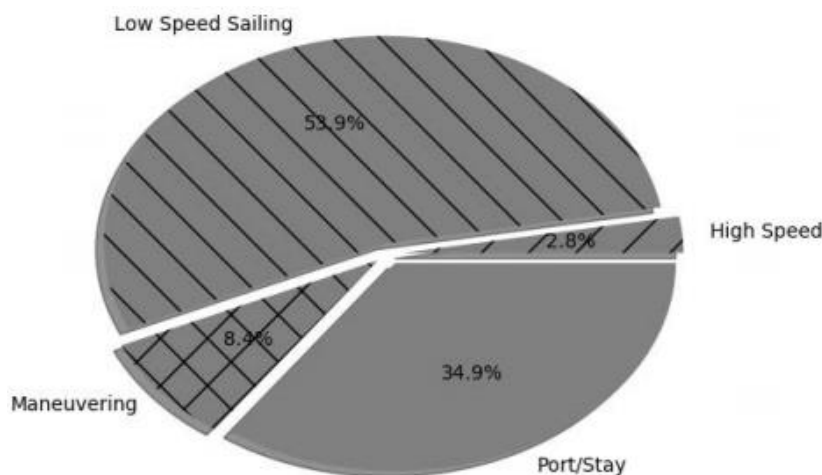


Kuva 5. Risteilyaluksen energiatarpeet tammikuussa. (Baldi et al. 2018, 16.)



Kuva 6. Risteilyaluksen energiatarpeet heinäkuussa. (Baldi et al. 2018, 16.)

Risteilyalusten ajallisesti suurimmat operointiosuudet koostuvat satamassa olemisesta ja tasakäyntisestä liikkumisesta merellä. Satamassaoloaika täyttää noin kolmanneksen koko operointiajasta, joten sähkö- ja lämpöenergiaa ei voida perustaa pelkästään dieselmootto- reiden ja näiden sivutuotteiden, esimerkiksi lämpimien savukaasujen, varaan. Tästä syystä satamissa saatetaan joutua turvautumaan täysin erillisen, esimerkiksi öljyllä toimivan höyrykattilan, käyttämiseen. Kuvan 7 ympyräkaavio kuvaa väliä Tukholma- Maarianhamina risteilevän aluksen suhteellisia operointiosuuksia. Siitä huolimatta vaikka operointiosuuksien suhteet vaihtelevat risteilijöiden operatiivisen toiminnan mukaan, voidaan kyseistä jakoa pitää yleisellä tasolla melko tyyppillisenä risteilyaluksille. (Baldi et al. 2018, 14.)



Kuva 7. Risteilyalusten operointiosuudet. (Baldi et al. 2018, 14.)

3.2 Energian tuottaminen ja moottorit

Monien vuosikymmenien ajan risteilyaluksissa pääsääntöisenä voiman lähteenä ovat olleet ison kokoluokan hyvin toimintavarmoina pidetyt hidas- ja keskinopeakäyntiset dieselmoottorit, joilla propulsiovoima on tuotettu nimenomaan mekaanisesti. Perinteisten polttomootto- reiden sijasta osa liikennöivistä risteilyaluksista käyttää voimanlähteenä kaasuturbiineita, mutta niiden osuus kaikista liikennöivistä risteilyaluksista on hyvin marginaalinen. Kaasu- turbiinien käytössä on paljon hyviä puolia perinteiseen polttomoottoritekniikkaan verrattu- na. Esimerkiksi päästöt ovat ympäristölle kevyemmät ja melu- sekä värinähaittoja on vä- hemmän. Tästä huolimatta, etenkin katsottuna taloudellisesta näkökulmasta, ei siitä ole ol- lut isossa mittakaavaksi haastajaksi perinteiselle polttomoottoritekniikalle. Kaasuturbiinien hyödyt nousevat parhaiten esille aluksen operoidessa suurilla nopeuksilla, minkä vuoksi

niiden tärkein käyttökohde onkin sotilaskäytössä. Joistakin risteilyaluksista löytyy myös polttomoottori-kaasuturbiini hybridiratkaisuja energiantuotolle. (Oates 1998. Hansen ja Wendt 2015, 2229.)

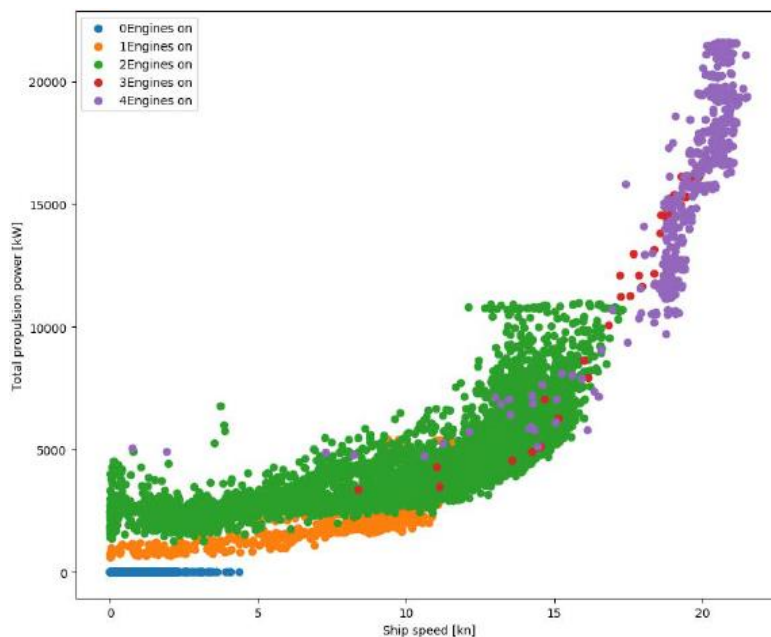
Moderneissa risteilyaluksissa yhä yleistyvää kehityssuuntaa viimeisen vuosikymmenen aikana on ollut se, että propulsiovoima tuotetaan mekaanisen propulsiovoiman sijasta sähkömoottoreilla kokonaan tai ainakin osittain niin sanotulla dieselsähköisellä voimansiirrolla. Dieselsähköinen voimansiirto yksinkertaisuudessaan tarkoittaa sitä, että dieselmoottorin tuottama voima muutetaan sähköisellä generaattorilla sähköksi ja osa tästä sähköstä käytetään sähkömoottoreiden voimanlähteenä. Risteilyaluksissa oheistoimintoihin tarvittava sähköenergian tarve on määrällisesti merkittävä, joten on todettu taloudellisesti kannattavimmaksi keskittää sähkön tuotto. Keskitetystä sähkön tuotannosta sähköä jaetaan sekä sähkömoottoreiden tarpeisiin että risteilyaluksen muihin tarpeisiin. Kyseisellä järjestelyllä ollaan päästy entistä parempiin kokonaishyötysuhteisiin. (Hansen ja Wendt 2015, 2229-2239.)

Eräs hyvin perinteisistä moottoriratkaisuista risteilyaluksiin on ollut Wärtsilän 46 nelitahtinen dieselmoottorimalli, jossa numero 46 kuvaa 460mm:sen sylinterin halkaisijaa. Moottorista on saatavilla eri tehoversioita, joista laivan rakennuttaja voi valita tarpeidensa mukaan sopivan teholuokan moottorin. Nykyään Wärtsilä 46:sta on kaupallisesti saatavilla versio 46F, joka on paranneltu versio maailmallakin hyvin tunnetuksi tulleesta alkuperäisestä 46:sta. Wärtsilän 46F:ssä voidaan käyttää polttoaineena HFO:ta, MDO:ta tai kevyempiä meridieseleitä esimerkiksi silloin, kun operoidaan tiukkoja päästövaatimuksia asettavissa satamissa. 46F täyttää myös IMO:n Tier 2 asetukset koskien pakokaasupäästöjä. Yksi tällä hetkellä suurimmista liikennöivistä risteilyaluksista on Turun telakalla rakennettu vuonna 2009 neitsytmatkansa saanut M/S Oasis of the Seas (Kuva 9). Sen pituus on 360m, leveys 65m, matkustajakapasiteetti 5400 ja se on varustettu kuudella Wärtsilän 46-sarjan moottorilla. Näistä kolme on 12-syliteristä 12V46-moottoria ja toiset kolme on 16-syliteristä 16V46-moottoria. Näiden yhteen laskettu nimellisteho on yli 96 MW. (Wärtsilä 2019a)



Kuva 8. Oasis of the Seas. (Wärtsilä 2009.)

Se, miksi risteilyalusten konehuoneet koostuvat yleensä useammasta pienemmästä moottoriyksiköstä, johtuu siitä, että tarvittavat tehokuormat vaihtelevat suuresti sen mukaan, ollaanko satamassa vai liikutaanko merellä. Tästä onkin todettu, että tehokuormia on helpompi hallita useammalla pienellä yksiköllä. Toinen syy on alusten turvallisuuden takaaminen vikatilanteiden sattuessa. Mikäli yksi tai jopa kaksi moottoria on pois pelistä, voidaan risteilyalus siitä huolimatta saattaa turvallisesti takaisin satamaan. Kuvasta 9 nähdään, kuinka montaa moottoria ajetaan silloin, kuin operoidaan tietyillä nopeuksilla. Tutkimuksessa arvioitiin nelimoottorisen Itämerellä risteilevän aluksen moottoreiden käyttöä. Kuvasta voimme päätellä, että valtaosa ajasta operoidaan joko kahdella tai neljällä moottorilla. Tämä on seurausta siitä, että tarvittava kuorma halutaan jakaa järkevästi moottoreiden kesken, jolloin saavutetaan haluttu nopeus, mutta ei kuormiteta mitään yksittäistä moottoria liikaa tai liian vähän. Tällöin päästään optimaalisiin ominaiskulutusnäyttöihin ja hyötysuhteisiin. (Baldi et al. 2018, 30.)



Kuva 9. Nelimoottorisen risteilyaluksen moottoreiden kuormitus operatiivisen nopeuden funktiona. (Baldi et al. 2018, 30.)

Iso osa moottoreiden energiasta päätyy propulsiovoimaa tuottaviin Azipod-ruoripotkuriyksiköihin, joita on Oasis of the Seas -risteilyaluksessa kolme 20MW nimellisteho omaavaa yksikköä (Kuva 10). Azipod-ruoripotkuri kääntyy itsessään 360 astetta, joten se korvaa perinteisesti laivojen ohjauksessa käytetyn peräsimen. Azipodin hyödyt nousevat esiin tarkasteltaessa energiatehokkuutta, koska perinteiseen potkuri-peräsinyhdistelmään verrattaessa sen hyötysuhde on jopa 20% korkeampi. Azipodilla laivan kääntäminen satama-alueilla on myös vaivattomampaa. Tämän lisäksi alusten keulaan on asennettu keulapotkureita entisestään tehostamaan laivan kääntymistä operatiivisesti haastavissa paikoissa, esimerkiksi satamissa. Oasis of the Seas-aluksen keulassa on neljä 5,5 MW sähköllä toimivaa keulapotkuria. (Wärtsilä 2009. ABB 2009. ABB 2016.)

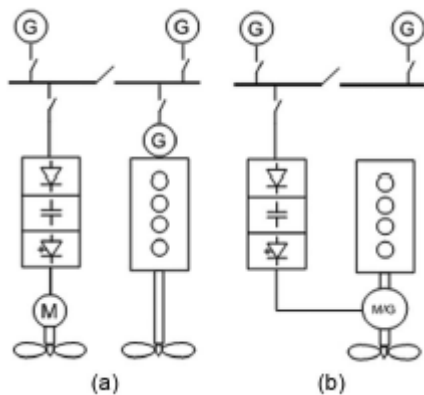


Kuva 10. Oasis of the Seas ja Azipod-ruoripotkuri. (ABB 2009.)

Polttoainepuolella eletävä murros on lisännyt niin sanottujen dual-fuel-moottoreiden kysyntää. Kehittyvä LNG:n jakeluverkko ja sen myötä parantunut saatavuus on luonut jalansijaa markkinoilla yhä vahvemmin dual-fuel-moottoreille. Dual-fuel-moottoreissa voi nimensä mukaisesti käyttää energialähteenä kahdenlaista polttoainetta, joko nestemäistä polttoainetta, esimerkiksi HFO:ta, tai kaasumaista polttoainetta, esimerkiksi LNG:tä. Dual-fuel moottorit antavat risteilevälle alukselle mahdollisuuden toimia joustavasti sen mukaan, missä päin maantieteellisesti operoidaan ja kuinka hyvin esimerkiksi LNG:tä, luontoa vähemmän kuormittavaa polttoainetta, on saatavilla. Lisäksi on mahdollista operoida taloudellista näkökulmaa ajatellen ja käyttää sitä polttoainetta, kumpaa on edullisemmin saatavilla. Esimerkiksi aiemmin mainitusta Wärtsilän 46F:stä löytyy myös 46DF, jossa pystyy

polttoaineena käyttämään LNG:tä, HFO:ta tai MDO:ta. (Wärtsilä 2019c. Repka et al. 2017, 14.)

Erilaiset sähkömekaaniset hybridiratkaisut propulsiovoiman tuotossa yleistyvät ja ovatkin vakiinnuttaneet asemansa meriliikenteessä vahvasti. Hybridiratkaisujen pyrkimyksenä on hyödyntää kunkin propulsiovoiman tuottajan parhaimmat puolet aina senhetkisen operatiivisen toiminnan mukaan ja saavuttaa näin korkeampia kokonaishyötysuhteita voimantuotossa. Kuvassa 11 näemme kaksi erityyppistä hybridiratkaisua propulsiovoiman tuottoon. Kuvan a-kohta kuvastaa tilannetta, jossa on erikseen sähköinen ja mekaaninen propulsioyksikkö. Kuvan b-kohta kuvaa puolestaan tilannetta, jossa propulsio tuotetaan kombiratkaisulla yhdessä propulsioyksikössä. Näiden lisäksi on olemassa paljon muitakin erilaisia propulsiovoiman kombiratkaisuita. Risteilyalus RMS Queen Mary 2 voidaan pitää aikansa yhtenä suunnannäyttäjänä, sillä siitä löytyy integroitu elektroninen propulsio ja sen voimantuotanto perustuu polttomoottorien, kaasuturbiinien ja sähkön kombiratkaisuun. RMS Queen Mary 2 valmistui vuonna 2004 ja oli valmistuttuaan maailman suurin risteilyalus. (RMS Queen Mary 2 cruises, 2015. Hansen ja Wendt 2015, 2239.)



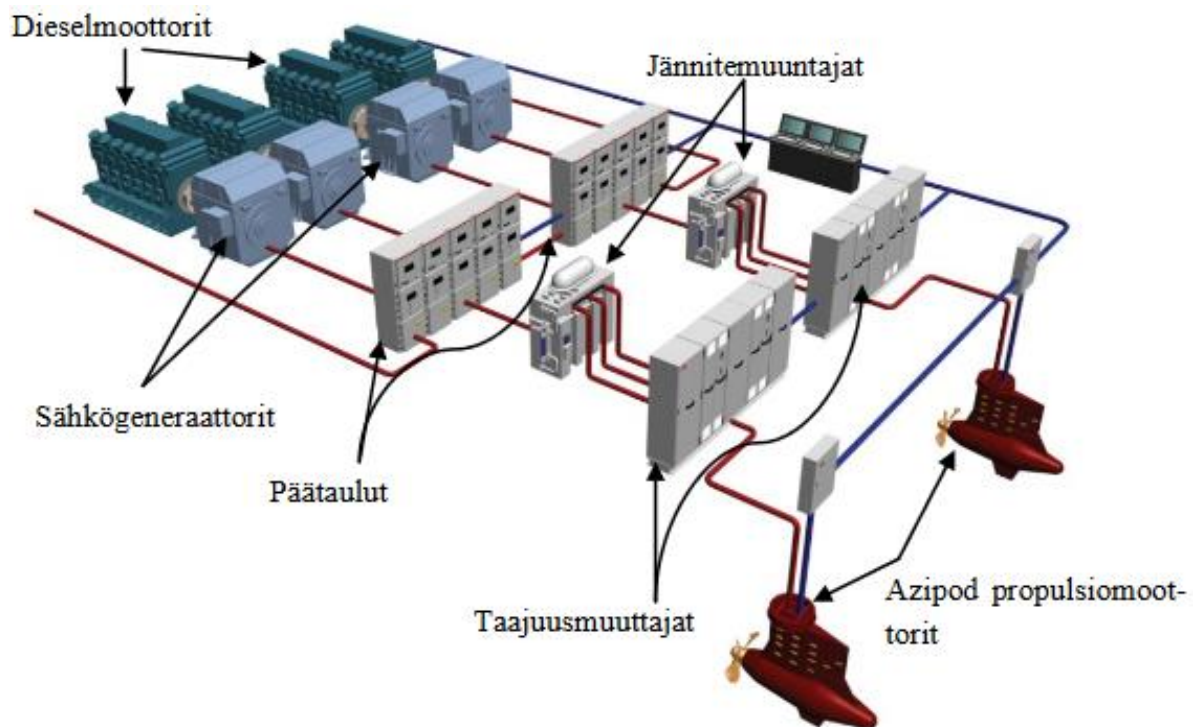
Kuva 11. Propulsiovoimantuoton hybridiratkaisuja. (Hansen ja Wendt 2015, 2239.)

3.3 Sähköjärjestelmät

Sähkön laadun varmistaminen on oleellinen osa sekä propulsiovoiman toimintavarmuutta että matkustajien mukavuuden varmistamista. Häätätapausten varalta on sähköiset järjestelmät rakennettu tasoittain, jossa tärkeimmät on priorisoitu ensimmäisenä. Lisäksi tärkeimmät kohdat pyritään kahdentamaan, jolloin vakavan vikatilanteen sattuessa saavutetaan redundanttisuus. Sähkön laadun merkitys korostuu myös tehdessä elinkaaritarkasteluja, eli toisin sanoen mitä tasalaatuisempaa sähköä pystytään syöttämään kulutuskojeille, sitä pidempi

elinkaari näillä on. Tämä on taloudellisesti hyvä ja se on myös luonnonvaroja säästävää. (Hyytiäinen 2012, 14-45.)

Yleisesti ottaen meriliikenteen käyttämät sähköjärjestelmät ovat ennen vanhaan poikenneet monin tavoin maalla käytettävistä järjestelmistä. Nykyään rakennettavat alukset ovat yhä enemmän samankaltaisia maapuolella käytettyjen järjestelmien kanssa. Näin tehostetaan kustannuksia ja suunnittelussa käytettyä aikaa. Laivan sähköverkon taajuus on yleensä 50 tai 60 Hz ja sitä ylläpidetään dieselmootoreiden pyörimisnopeuksilla. Käytetyt jännitetasot vaihtelevat 110 V ja 11 kV väliltä käyttökohteen mukaan, toisin sanoen tarvittavan tehontarpeen mukaan. Esimerkiksi moottoreita saatetaan hetkellisesti joutua käyttämään isoilla tehoilla, jolloin näille syötettävän jännitteen kasvattamisella voidaan suoraan vaikuttaa niistä saatuun tehoon. Sähkönjakelu tapahtuu päätaulujen kautta ja suurimmat käyttäjät on kytketty suoraan päätauluun. Kuvassa 12 on laivan sähköjärjestelmien pääkomponentteja. Laivojen sähkölaadulle on olemassa omat standardinsa ja säädöksensä, mutta ne ovat yleisesti löyhemmät kuin mantereella haastavien toimintaolosuhteiden vuoksi. (Hyytiäinen 2012, 14-45.)

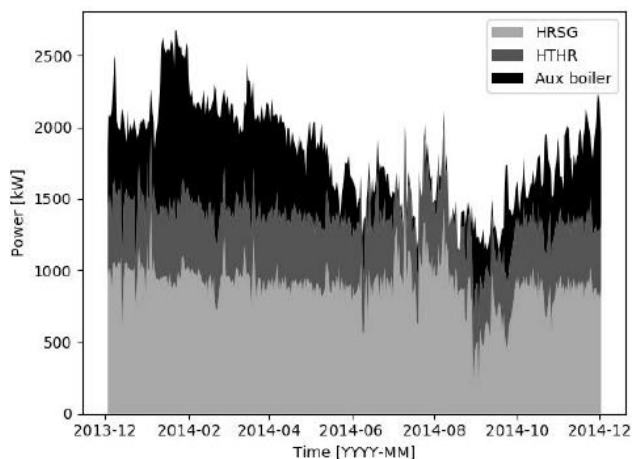


Kuva 12. Havainnekuva laivan sähköjärjestelmästä. (Hyytiäinen 2012, 15.)

3.4 Lämmön talteenotto ja tuotanto

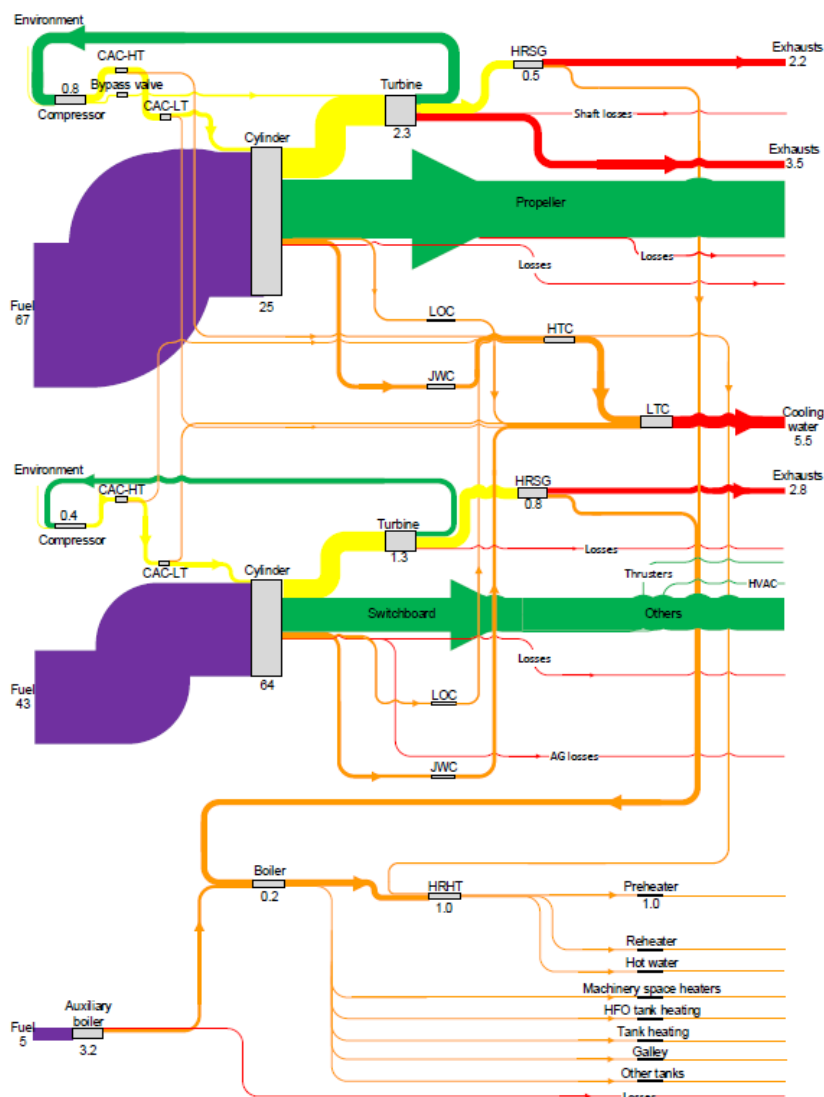
Dieselmootoreiden hyötysuhteen ollessa noin 50% kokoluokkaa korostuvat pakokaasuissa olevan lämmön ja moottoreiden jäähdytysveden sitoutuneen lämmön hyödyntäminen, mikäli halutaan tehdä mahdollisimman energiatehokkaita risteilijöitä. Risteilyalusten energiajärjestelmien hyvin olennainen osa onkin lämmön talteenottaminen moottorien sivutuotteena syntyneistä kuumista savukaasuista ja moottorien jäähdytykseen käytetyistä vesimassoista.

Lämmöntuoton kokonaisuus isoissa risteilyaluksissa on hyvin monimuotoinen prosessi ja se voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri lämpöä tuottavaan osa-alueeseen, jotka tyypillisesti ovat esimerkiksi erilliset höyrykattilat, HTHR-järjestelmät (Hot Water Heat Recovery) ja HRSG-järjestelmät (Heat Recovery Steam Generators). Toisin sanoen yleensä aluksessa on erikseen höyrypiiri, jossa höyryä tuotetaan savukaasujen lämmöllä, ja lämminvesipiiri, jossa vettä lämmitetään esimerkiksi moottorien jäähdytyksen yhteydessä. Lisäksi on olemassa erillisiä höyrykattiloita turvaamaan lämmön saatavuus kaikissa tilanteissa. Kuvassa 14 on esitelty näiden kolmen suhteellisia osuuksia vuodenajan mukaan väliä Maarianhamina-Tukholma risteilevällä aluksella. Laajemmassa mittakaavassa ajateltuna näin suuria vaihteluita ei ole esimerkiksi Oasis of the Seas -aluksella, koska se operoi pääsääntöisesti maantieteellisesti lämpimämmällä alueella, jolla ei ole yhtä isoja vuodenajoista johtuvia lämpötilan vaihteluita. Voimme kuitenkin todeta käytettävissä olevan datan perusteella, että suurin osa lämmöstä tuotetaan HTHR- ja HRSG-järjestelmillä. Lämmitykseen käytettävät erilliset höyrykattilat ovatkin suurimmaksi osaksi käytössä ainoastaan satamissa ja kulutuspiikkien tasauksessa esimerkiksi talvella kovimmilla pakkasilla. (Baldi et al 2018, 18.)



Kuva 13. Laivan lämmöntuotto eri vuodenaikoina. (Baldi et al. 2018, 18.)

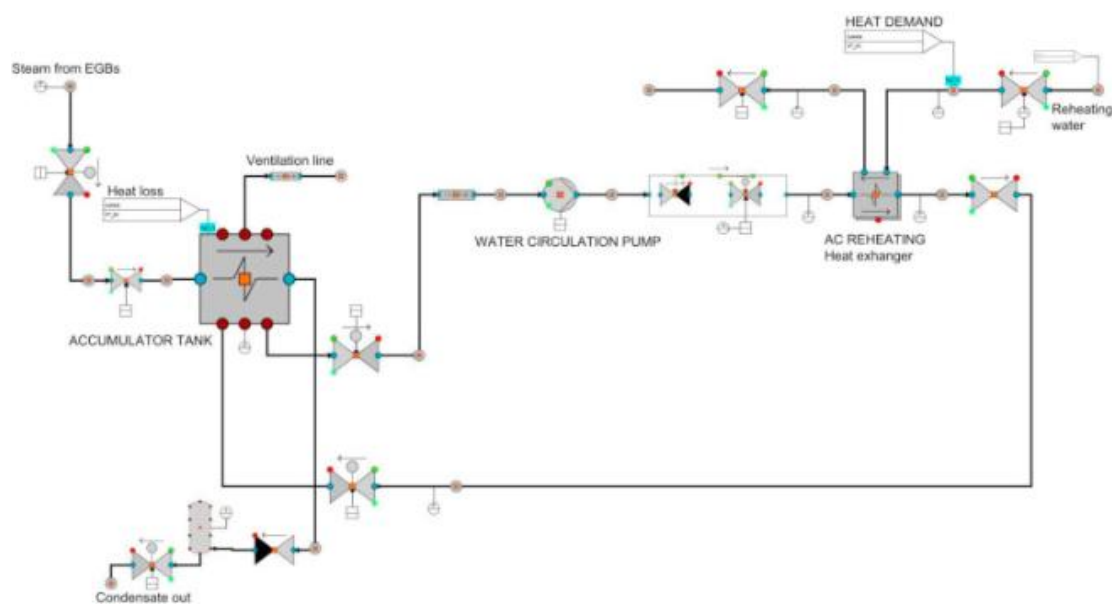
Modernit risteilyalukset eroavatkin siinä suhteessa vanhemman kaluston kanssa, että isojen moottoreiden tuottamat hukkaenergiavirrat hyödynnetään tehokkaammin. Verratessamme aiemmin työssä esiteltyä kuvaa 4 2000-luvun molemmin puolin rakennetuista laivoista ja moderneja risteilyaluksia kuvaavaa kuvaa 16 näemme selvän eron hukatuissa energiavirroissa. Pyöreästi samoilla polttoainemäärillä energiahäviöiden määrä on moderneissa risteilyaluksissa jopa neljä kertaa pienempi. Energiähäviöiden määrää on toki pyritty kompensoimaan vanhempiaikaisissa risteilyaluksissa erilaisilla jälkeempään asennetuilla ratkaisuilla, mutta siitä huolimatta uuden ja 20 vuotta vanhan risteilyaluksen energiatehokkuudessa voi olla huomattavan suuri ero. (Baldi et al. 2018, 18-21.)



Kuva 14. Modernin risteilyaluksen energiavirtakaavio. Violetti kuvaa kemiallista energiaa, vihreä mekaanista/sähköistä energiaa, keltainen savukaasujen exergiaa, oranssi jäähdytysvirtojen energiaa ja punainen energiahäviöitä. Luvut kuvaavat yksikköä GWh/vuosi. (Baldi et al. 2018, 21.)

Vuonna 2013 valmistunut erittäin modernina risteilyaluksena pidetty Viking Grace käyttää tehokkaasti moottorien hukkalämmön ja jopa varastoi sitä satamassa oloa varten. Moottorien jäähdytysjärjestelmä koostuu kylmästä ja kuumasta piiristä. Kuuman piirin energiaa käytetään makean veden tuottamiseen, käyttövedenlämmitykseen ja ilmastoinnin sekä valmistilassa olevien moottorien esilämmitykseen. Kylmän puolen energiaa käytetään puolestaan osana LNG:n voimantuottoa. Moottorien kuumilla savukaasuilla tuotetaan höyryä savukaasukattiloilla EGB:llä (Exhaust Gas Boiler). Höyryllä puolestaan lämmitetään laivaan jaettavan ilmastoinnin ilmaa, raskaan polttoöljyn säiliötä ja sen putkia, kuumaa puhdasta käyttövedettä ja autokantta. (Ahtila et al. 2016.)

Isoilla moottorikuormilla operoidessa höyryä on saatavilla ylen määrin, joten energiatehokkuuden parantamiseksi Viking Graceen on asennettu kaksi lämpösäiliötä. Lämpösäiliöiden lämpöenergialla voidaan lämmittää risteilyalusta sen ollessa satamassa. Lähtökohtaisesti satamassa käytetään lämpövarastojen lämpöenergiaa, ja mikäli se ei ole riittävä kattamaan lämmityksen tarvetta, sen tukena käytetään erillistä lämmitykseen tarkoitettua höyrykattilaa. Alla oleva PI-kaavio (Kuva 16) kuvaa yksinkertaistetusti Viking Gracen EGB:stä tulevan höyryn käyttöä ja lämmön kulkua. Kuten näemme PI-kaaviosta, kokonaisuus sisältää monia venttiileitä, joiden avulla hallitaan prosessia. Venttiilien käyttö mahdollistaa prosessien kannalta tarvittavien paineiden ylläpitämisen. Kahden lämpösäiliön kapasiteetti on kuvattu yhtenä kokonaisuutena kaavion selkeyttämisen vuoksi. (Ahtila et al. 2016.)



Kuva 15. Viking Gracen jätelämpöjärjestelmä. (Ahtila et al. 2016.)

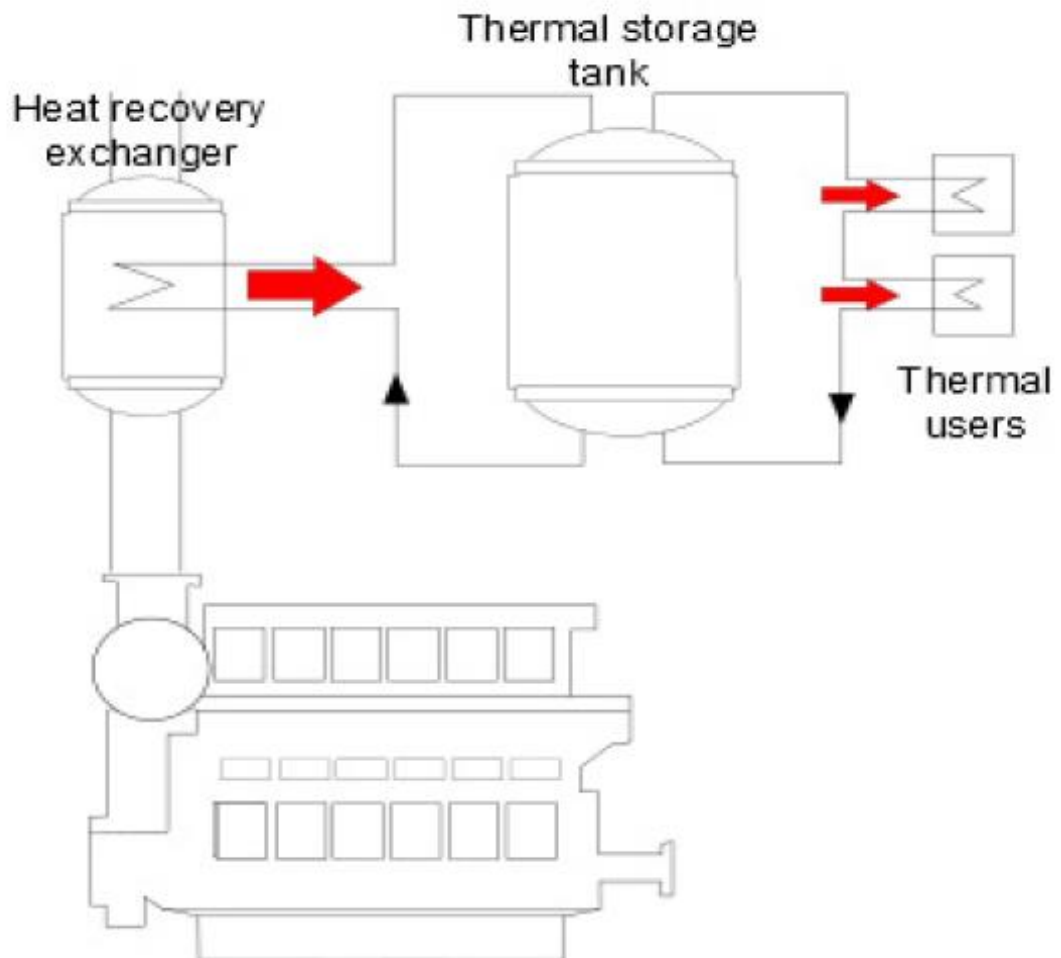
Kuten aiemmin kävi ilmi, on savukaasukattila höyryn tuottamisen olennaisin yksittäinen osa. Kattilat räätälöidään aina jokaisen risteilyaluksen lämmöntarpeen sekä käytettävien savukaasuvirtojen mukaan. Savukaasukattiloita on olemassa monenlaisia, mutta yksinkertaisesti ajateltuna perustoimintaperiaate on sama kuin missä tahansa lämmönsiirtimessä. Yleensä kuumat savukaasut virtaavat kattilan vaipassa. Vaipan sisällä kulkee putkia, joissa vesi virtaa nestemäisenä kattilan sisään ja tulee höyrynä ulos. Höyryä saatetaan tuottaa monella eri painetasoilla riippuen laivan lämmitysjärjestelmien toimintaperiaatteista. Toisin sanoen se, mihin höyryä halutaan käyttää, määrää sen, minkälaista höyryä on tarpeen tuottaa. Yleensä höyryä tuotetaan risteilyaluksissa vähintään kahdella painetasolla, jotka ovat niin sanotusti korkea- ja matalapainetaso. Savukaasukattiloita voi olla myös useampia, jolloin ne tuottavat höyryä eri tarkoituksiin. (Kyriakidis et al. 2017, 286-291.)

3.5 Energiavarastot, akkuteknologia ja hukkalämmön muuntaminen sähköksi

Energiatehokkuuden parantamisen näkökulmasta eletään aikoja, jolloin keskustelu energiavarastojen hyödyntämisestä meriliikenteessä käy kuumana. Kuten työn aiemmassa osassa mainittiin, risteilyalusten operoidessa suhteellisen suurilla kuormilla dieselmootto- reiden hukkalämpöä on ylen määrin tarjolla. Asentamalla laivoihin tekniikkaa, joka pystyy varastoimaan ylimääräisen lämmön satamaan käytettäväksi ja/tai muuttamaan sen sähköksi aluksen sähköntarpeisiin, saadaan polttoainesäästöjä. Tekniikan ja tutkimuksen jatkuvan kehittymisen vuoksi investointikustannusten laskeminen sekä käytettyjen tekniikkojen toimintavarmuus on johtanut siihen, että joihinkin moderneihin risteilyaluksiin onkin jo asennettu erilaisia energiavarastoja, ja mikäli kehityksessä ei tapahdu mitään olettamatonta, tulevat ne yhä edelleen lisääntymään tulevaisuudessa merkittävästi.

Nykyisillä sähkön varastointitekniikoilla ei ole taloudellisesti kannattavaa toteuttaa sähkön varastointia risteilyaluksissa, joten suurin osa taloudellisesti kannattavista energiavarastoratkaisuista on tällä hetkellä lämpövarastoja. Lämpövarastojen suurin hyöty on se, että niillä pystytään reagoimaan lämmöntarpeen kulutuspiikkeihin ja vähentämään satamassa tarvittavan lämmöntuottamisen määrää erillisillä öljykattiloilla. Lämpövarastot on liitetty osaksi risteilyaluksen lämmityskokonaisuutta. Kuvassa 17 näemme yksinkertaistetun lämpövaraston toimintaperiaatteen. Polttoaineen polttamisesta syntyvät savukaasut johdetaan lämmönsiirtimen vaippaan, jossa se lämmittää putkissa kiertävää vettä. Tämän jälkeen

lämmin vesi virtaa lämpövarastoon, jossa sitä varastoidaan ja jaetaan eteenpäin sen mukaan, kun on tarvetta. Sähkön varastointi tulee tulevaisuudessa mahdollisesti kannattavaksi myös risteilyalusten parissa. Uusiutuvan energian määrän kasvaessa globaalisti tulee sähkövarastojen tarve ja kysyntä kasvamaan suuresti vaihtelevan tuotannon takia. Tutkimuksen lisääntyessä ja teknologian kehittyessä ennen pitkää maan päälle saadaan taloudellisesti kannattavia sähkövarastoja, minkä jälkeen ne saattavat tulla osaksi risteilyaluksien energiajärjestelmiä. (Baldi et al. 2015.)



Kuva 16. Lämpövaraston yksinkertaistettu toimintaperiaate. (Baldi et al. 2015.)

Aiemmin kappaleessa 3.4 esitelty Viking Gracen risteilyaluksen lämpöjärjestelmän osana toimiva lämpövarasto toimii seuraavanlaisesti: lämmönsiirto lämpövarastossa tapahtuu siten, että putkipuolella virtaa kuuma höyry ja vaippapuolella lämmitettävä vesi. Lämmitetty vesi virtaa jatkokäyttöön tai varastoituu, ja kondensoitunut höyry jatkaa matkaansa ulos lämpövarastosta. Savukaasukattilasta tulevan höyryn paineen ollessa yli 8,5 baaria venttiili

aukeaa ja höyry virtaa lämpövaraston lävitse. Venttiilin aukeaminen sulkee erillisten öljylä toimivien höyrykattiloiden käytön. Lämpövaraston saavuttaessa 95 °C lämpötilan kontrolliventtiili, joka sijaitsee ennen lämpövarastoa, sulkeutuu siitä syystä, että kiehunnaa ei tapahtuisi lämpövaraston sisällä. Tämä sykli toteutuu ja tasapainottelee aluksen operoidessa merelle, kun hukkalämpöä on hyvin saatavilla. Satamassa hukkalämpöä on huomattavasti vähemmän tarjolla, mikä johtaa ennen pitkää höyrylinjan paineen alenemiseen. Höyrylinja paineen laskiessa alle 8.5 baarin höyrylinjan venttiili sulkeutuu. Tämän jälkeen lämmön purkaminen lämpövarastosta tapahtuu manuaalisesti ja erilliset lämmön tuoton apuna toimivat höyrykattilat käynnistetään siinä tapauksessa, että lämpövaraston kapasiteetti ei riitä täyttämään aluksen tarpeita. Lämpövaraston mitoituksessa on tärkeää tuntea aluksen operointiprofiili, jotta tiedetään, kauanko alus viettää satamissa aikaa sekä minkälaisessa ilmastossa se operoi. Näin saadaan selville arvio siitä, kuinka suuri lämpömäärä tarvitaan satamassaoloaikana, jolloin vältetään mahdolliset yli- ja alimitoitukset. (Ahtila et al. 2016.)

Aiemmin haastavimpana energiatehokkuuden kannalta pidettiin suhteellisten matalalämpöisten hukkaenergiavirtojen hyödyntämistä. Risteilyalusteollisuuden odottaessa akkuteknologian kehittymistä on markkinoille kehitetty kompakteja ratkaisuja sähkön tuottamiseen matalilla hukkalämmöillä. Näiden ratkaisujen tekniikka perustuu ORC-prosesseihin (Organic Rankine Cycle). ORC-prosessi yksinkertaisuudessaan toimii kuten perinteinen höyryturbiinivoimalaitoskin, mutta eroavaisuutena on se, että kiertoaaineena on jokin orgaaninen aine. Orgaanisen aineen funktio on se, että sen höyrystymislämpötila on matalampi kuin vedellä, eli suhteellisen matalalämpöinenkin hukkalämpö, esimerkiksi moottoreiden jäähdytysvesi, voidaan käyttää hyödyksi. Nykytekniikalla ei pystytä varastoimaan sähköä taloudellisesti, mutta sen tuottaminen on periaatteessa mahdollista lämpövaraston lämmöllä satamassaoloaikanakin. Toisaalta satamassa ollessa on myös mahdollista tuoda mantereelta puhtaasti tuotettua sähköä laivaan, mutta mikäli lämpöä on varastossa ylen määrin, voidaan se käyttää sähköntuottamiseen.

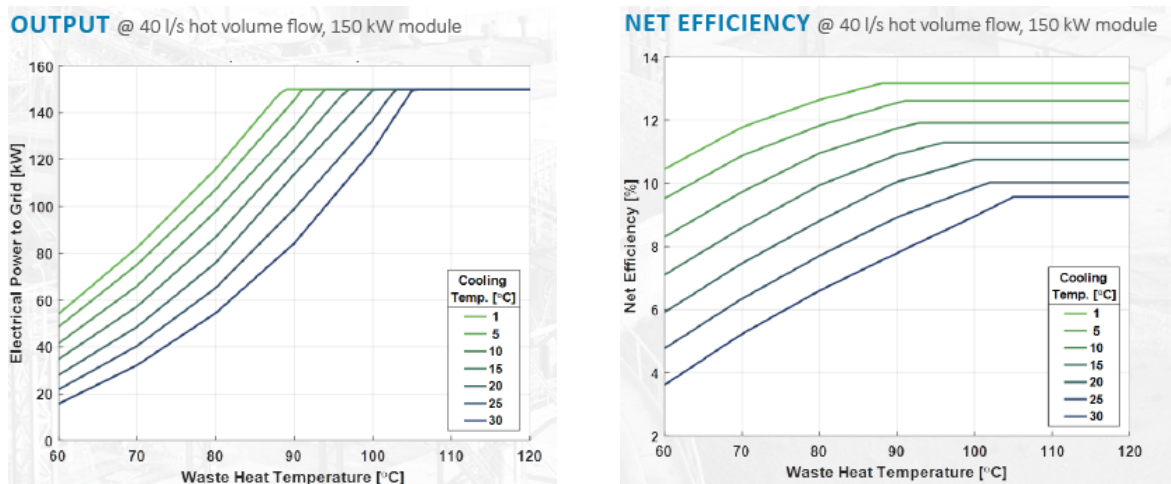
Ruotsalainen Climeon Ab tarjoaa hyötysuhteen ja tilankäytön näkökulmasta muihin markkinoilla oleviin ratkaisuihin nähden hyvin kompakteja 150kW ominaistehon omaavia modulaarisia sähköntuotantoyksiköitä. Kyseiset yksiköt toimii suhteellisen matalalla noin 2,5 baarin paineella. Halun ja tarpeen mukaan moduuleita voi liittää sarjaan, jolloin sähköntuotokapasiteettia voidaan kasvattaa. Kuvassa 18 näemme Climeonin yksinkertaistetun

toimintaperiaatteen. Suljetussa piirissä työskentelevä orgaaninen fluidi höyrystetään, ja höyry virtaa turbiiniin. Höyryn johdosta turbiini pyörii ja tuottaa sähköä. Turbiinista fluidi virtaa jäähdytysastiaan ja jäähdytysastiasta fluidia virtaa sekä jäähdytyspiiriin että yhä edelleen höyrystyspiiriin uudelleen. (Climeon)



Kuva 17. Modulaarinen sähköntuotantoyksikkö Climeon. (Climeon)

Modulaariyksikön tarjoama teho ja hyötysuhde riippuvat lämmitys- ja jäähdytyspiirien käytössä olevista lämpötiloista. Esimerkiksi käytettävissä oleva 90 °C lämmönlähde, jonka virtaama on 40 l/s, pystyy tuottamaan 82-150 kW verran sähkötehoa riippuen siitä, minkä lämpöistä vettä on tarjolla jäähdytyspiirille. Kyseisillä parametreilla päästään n.7,9-13% kokonaishyötysuhteeseen (Kuva 19). Climeonin tekniikkaa on käytössä muun muassa Viking Grace aluksessa. (Climeon 2017.)



Kuva 18. Climeonin teho sekä hyötysuhde lämmön funktiona. (Climeon 2017.)

Etsittäessä energiatehokkaita vaihtoehtoja myös tuuli- ja aurinkovoiman hyödyntäminen on mahdollista. Tuulivoiman kohdalla jo vuosikymmeniä sitten keksitty roottoripurje on nos-

tanut päätään markkinoilla. Roottoripurjeen toiminta perustuu paine-erojen aiheuttamaan Magnus-efektiin, joka pienentää aluksen liikkumiseen tarvittavaa propulsiovoiman tarvetta (Marine Log, 2017). Tällä pystytään teoriassa pienentämään muutamia prosentteja polttoaineen kulutusta. Todellisuudessa saatavasta hyödystä löytyy monia mielipiteitä, ja roottoripurjeesta saatava hyöty riippuu paljon operointiolosuhteista. Aurinkoenergian käyttäminen risteilyaluksissa ei ole kovin yleistä ja itse näenkin sen hyvin pitkälti näennäisenä palasena tarkasteltaessa koko risteilyalusten energiantuottoa. Aurinkoenergia tarvitsee suhteellisen suuren pinta-alan tuottaakseen merkittävän määrän energiaa. Risteilyaluksessa energiatarve on niin suuria ja savukaasujen mukana oleva exergia niin suurta, että aurinkoenergialle ei varsinaisesti ole tarvetta. Lisäksi toimintaolosuhteet merellä liikkuesssa luovat aurinkopaneelien elinkaariin alentavia tekijöitä. Joka tapauksessa varustamot ja risteilijät saattavat saada aurinkoenergian lisäämisestä merkittäviä imagoetuja kilpaillessaan asiakkaista, ja varmasti osin tästä syystä joihinkin risteilyaluksiin on asennettu pienen kapasiteetin aurinkovoimaloita osaksi sähköntuottoa. Tällä kapasiteetilla voidaan osallistua esimerkiksi valaistukseen. Tuuli- ja aurinkoenergian todellinen merkitys modernien risteilyaluksien energiajärjestelmissä on suhteellisen pieni, joten niitä ei käsitellä tämän työn puitteissa sen tarkemmin. (Hochberg 2017.)

4 PÄÄSTÖJÄRJESTELMÄT

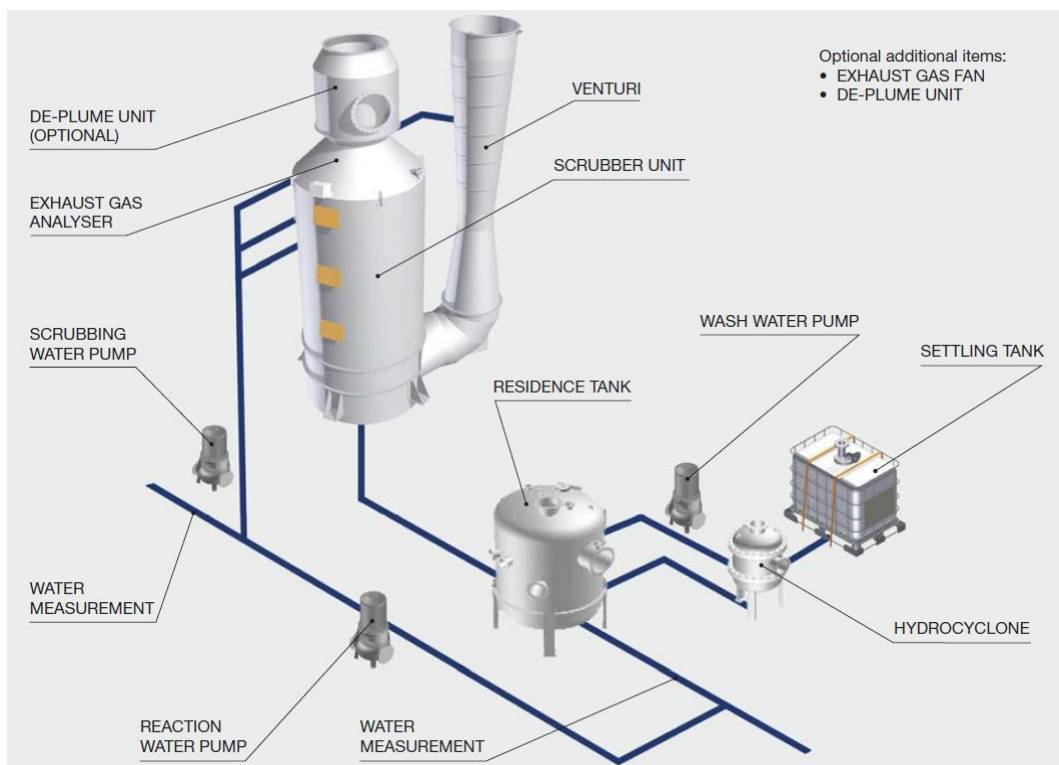
Rikkipesureille on syntynyt merkittävät kaupalliset markkinat päästörajoitusten kohdistuessa voimakkaasti nimenomaan rikkipäästöihin meriliikenteessä. Meriliikenteessä on paljon risteileviä aluksia, jotka on rakennettu 2000-luvun molemmin puolin, toisin sanoen moottoritekniset ratkaisut on perustettu perinteiseen raskaan polttoöljyn polttamiseen. Näiden aluksien käsillä olevat vaihtoehdot päästöjen rajoittamiseksi ovat joko konfiguroida konehuoneistoa ympäristöystävälliseksi uusilla moottoriteknisillä ratkaisulla tai liittää osaksi järjestelmää rikkipesuri. Konehuoneiden isompaa konfigurointia on perinteisesti pidetty hyvin kalliina ratkaisuna, mistä syystä yleensä ratkaisua päästörajoitusten saavuttamiseksi on haettu rikkipesureilla tai siirtymällä HFO:sta puhtaampaan MDO:hon tai MGO:hon. Käyttöikänsä puolella välissä olevien alusten konehuoneen konfigurointi esimerkiksi LNG-käyttöisiksi ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Rikkipesuriin sijoittaminen nähdään yleensä kannattavampana ratkaisuna kuin vähärikkisen MDO:n tai MGO:n käyttäminen, koska HFO:n hinta on huomattavasti edullisin näistä kolmesta. Forsmanin laskelmien mukaan rikkipesureiden takaisinmaksuaika vaihtelee puolesta vuodesta puoleentoista vuoteen. Laskelmat suoritettiin TUI Cruisesin Mein Schiff -sarjan risteilyaluksille ja rikkipesurin arvioituksi kokonaiskustannukseksi saatiin n. 3,3 miljoonaa euroa (Forsman 2017). Wärtsilän mukaan takaisinmaksuajat ovat samaa kokoluokkaa (Wärtsilä 2017a). Tietenkin takaisinmaksuaika on vahvasti riippuvainen risteilyaluksen operatiivisesta toiminnasta ja vuosittaisesta polttoaineen kulutuksesta. Monessa risteilyalalla toimivassa yrityksessä ajatellaan varmasti, että ajetaan vanha kalusto käyttöikänsä päähän rikkipesureilla, minkä jälkeen uusia aluksia tilattaessa punnitaan vakavissaan siirtymistä LNG:llä toimiviin aluksiin, kun jakeluverkkokin on ehtinyt kehittyä.

Typen hillitsemiseksi voidaan tehdä paljon jo pelkillä operatiivisilla toimilla sekä koneteknisillä ratkaisulla. Monet nykysukupolven moottorit saavuttavat Tier I-II tasojen vaatimukset, mutta saavuttaakseen tason Tier III vaatimukset risteilyaluksen täytyy käsitellä pakokaasuja SCR-katalyyttiin perustuvalla tekniikalla. SCR-katalyytti perustuu typen sidontaan melko yksinkertaisella pelkistysreaktiolla. (Ammar ja Seddiek 2017, 166-167.)

4.1 Rikkipesurit

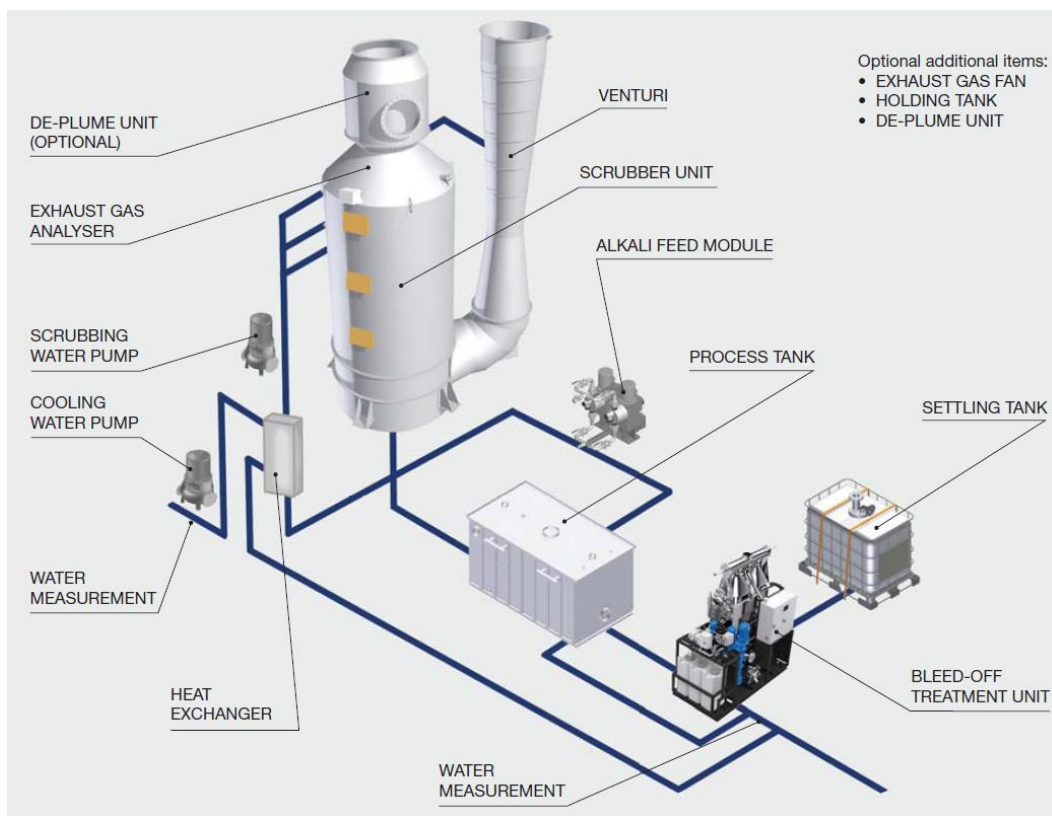
Rikkipesureiden toiminta perustuu joko avoimeen tai suljettuun kiertoon tai näiden hybridratkaisuun. Avoimessa kierrossa (kuva 21) savukaasut johdetaan venturiputken kautta pesuriyksikköön, jossa merivettä ruiskutetaan savukaasujen joukkoon kolmessa eri vaiheessa. Ensimmäinen ruiskutus tapahtuu jo venturiputkessa, mutta kaksi jälkimmäistä tapahtuvat varsinaisessa pesuyksikössä. Savukaasuihin suihkutettu vesi kulkeutuu seuraavaksi säilytystankkiin, josta se virtaa yhä edelleen vedenkäsittelymoduuliin. Moduulista puhdas vesi jatkaa matkaansa säilytystankin puhtaalle puolelle ja likainen liete sille tarkoitettuun erilliseen säilytystankkiin. Puhdas vesi johdetaan yhä edelleen säilytystankin puhtaalta puolelta mereen. Likaisen lietteen säilytystankki tyhjenetään satamassa. Avoimessa kierrossa ei tarvita erillisiä kemikaaleja rikkipesurin toimintaan, vaan rikkioksidien neutralointi perustuu meriveden emäksisiin ominaisuuksiin. (Wärtsilä 2017a.)



Kuva 19. Rikinpesun avoin kierto. (Wärtsilä 2017a.)

Suljetun kierron toiminta (kuva 22) on pääasiassa pitkälti samanlainen kuin avoimen kierron. Suljetussa kierrossa ruiskutetaan myös vettä useammassa tasossa savukaasujen joukkoon, mutta suihkutettu vesi on puhdasta vettä, jonka joukkoon lisätään natriumhydroksidia eli lipeää. Lipeän tehtävä on neutralisoida rikkioksidit. Merivesi virtaa erillisessä jääh-

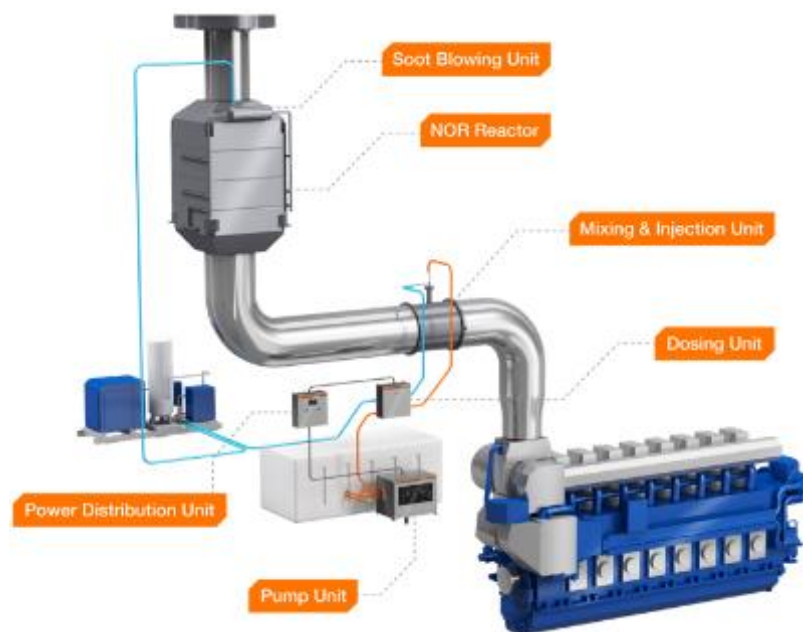
dytyspiirissä ja ei varsinaisesti muuten ole osallisena pesuoperaatioon. Avoimen ja suljetun kierron lisäksi on olemassa hybridiratkaisuja, jotka antavat joustavuutta aluksen operoinnin mukaan. Esimerkiksi jos toimitaan maantieteellisesti sellaisella vesialueella, jossa meriveden puskurointikyky ei riitä rikkioksidien neutraloimiseen, voidaan käyttää suljettua kiertoa. Kaikissa rikkipesureissa automatiikka on vahvasti läsnä. Esimerkiksi ennen kuin puhtaaksi käsitelty vesi voidaan juoksuttaa mereen, täytyy olla täysin varma sen puhtaudesta. Siitä syystä sitä mitaillaan automatiikan avulla koko ajan ja seurataan, että se täyttää IMO:n asettamat vaatimukset. Lisäksi vikatilanteissa savukaasut voidaan juoksuttaa suoraan ilmakehään ilman niiden juoksuttamista pesurin läpi. Savukaasuja saatetaan juoksuttaa myös kustannussyistä ilman pesua ilmakehään, mikäli ei toimita SECA-alueella. Täten saatetaan tehdä säästöjä huolto- ja energiakustannuksissa sekä pidentää pesurin käyttöikää. Wärtsilän mukaan rikkipesureiden jälkiasennuskin onnistuu vaivatta. (Wärtsilä 2017a.)



Kuva 20. Rikkipesun suljettu kierto. (Wärtsilä 2017a.)

4.2 Typpioksidit ja SCR-teknikka

Typpioksidien rajoittaminen perustuu yksinkertaiseen pelkistysreaktioon, jossa teknisessä pääosassa on SCR-teknikka eli selektiivinen katalyyttinen pelkistys. SCR-systeemin avulla typen haitalliset oksidit muutetaan vedeksi ja typpikaasuksi. Pelkistimenä käytetään usein ureaa, jota ruiskutetaan vesiliuoksena pakokaasujen joukkoon. Urea hajoaa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi. Ammoniakin reagoidessa typenoksidien kanssa syntyy vesihöyryä ja typpikaasua. Kuvassa 22 on esitelty havainnekuva SCR-systeemin kokonaisuudesta. SCR-systeemi koostuu varsinaisesta pelkistysyksiköstä eli NOR-reaktorista ja muutamasta apuyksiköstä, jotka ovat tarpeellisia kokonaisuuden toimimiselle. Wärtsilän SCR-systeemi käy kaikille polttoaineille ja se pystytään myös tekemään jälkiasennuksena laivoihin. NOR-reaktorin koko riippuu käytetystä polttoaineesta ja moottorin tehosta. Typpioksidien kontrollointi on edullisempaa rikkioksideihin verrattuna. SCR-systeemien kokonais hinnat ovat muutamista sadoista tuhansista ylöspäin, riippuen savukaasujen virtaamasta (Abadie ja Goicoechea 2018, 441). SCR-katalyytiikan lisäksi savukaasujen takaisinkierätyks eli EGR on vaihtoehto typpioksidien vähentämiseksi. Esimerkiksi integroimalla EGR osaksi lämmitysjärjestelmiä on energiatehokas ratkaisu. Yleisesti ottaen alan muutkin toimijat kuin Wärtsilä tarjoavat samankaltaiseen tekniikkaan perustuvia päästöjärjestelmiä. Nämä kyseiset tekniikat ovat vakiinnuttaneet asemansa päästöjen hallinnassa. (Wärtsilä 2017b. Ammar ja Seddiek 2017, 166-167.)



Kuva 21. SCR-systeemiyksikkö. (Wärtsilä 2019d.)

4.3 Päästöjen vähentyminen

Alla olevasta taulukosta 1 näemme, minkä verran päästöhyötyjä voisi saavuttaa eri tekniikoita asentamalla. Kyseisen taulukon tulokset ovat suuntaa antavia ja todellista arvioita tehdessä pitäisi ottaa huomattava määrä erilaisia parametreja huomioon, jotta päästäisiin täsmälliseen lopputulemaan. Lisäksi on huomioitava päästöjenhillintäsektorin kehittyvän nopeasti. Kehitteillä on varmasti tuotemalleja, joilla voidaan sitoa taulukon arvoja paremmin päästöjä, vaikka päästöjenhillintään käytetty perustekniikka onkin samaa.

Kuten näemme, kyseiset tekniikat eivät ole syyttä vakiinnuttaneet asemaansa päästöjen hillinnässä. SCR-kokonaisuuksilla saadaan 90% typpipäästöistä vähennettyä. Rikkipesureilla voidaan sitoa merkittävä osa rikkioksideista. Vaihtamalla HFO:sta LNG:hen tai käyttämällä rikkipesurin ja EGR:n kombiratkaisua saadaan laskettua merkittävästi monia tärkeimmistä päästökomponenteista. Näistä nostettakoon esille polttoaineen vaihdoksesta se, että LNG:tä käyttävät risteilyalukset ovat dual-fuel moottoreilla toimivia, joten ne eivät operoi yleensä sataprosenttisesti pelkästään LNG:llä. Lisäksi LNG:n polton yhteydessä tapahtuvaa metaanin vuotamista ohi polttoprosessin ilmaan ja siitä tuleviin ympäristöhaittoihin täytyy ajatuksena suhtautua hyvin kriittisesti. (Burel et al. 2013.)

Taulukko 1. Asennetun tekniikan avulla saavutetut päästövähennykset. (Burel et al. 2013.)

Asennettu tekniikka	SOx (%)	NOx (%)	PM (%)	CO2 (%)
Vaihto HFO:sta LNG:hen	- 90-100	- 80-85	- 100	- 20-25
Rikkipesuri	- 75	0	- 25	0
SCR	0	- 90	0	0
Rikkipesuri + EGR	- 93	- 35	- 63	0

5 YHTEENVETO

Tässä työssä tehtiin kirjallisuuskatsaus risteilyaluksien energiajärjestelmiin. Työn tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät ovat vaikuttaneet risteilyaluksien energiajärjestelmien nykytilaan ja millä tavoin. Työn puitteissa perehdyttiin risteilyaluksien varsinaisiin energiajärjestelmiin sekä tämän lisäksi päästöjärjestelmiin, koska ne ovat hyvin vahvasti linkittyneenä toisiinsa nykypäivän risteilyaluksissa IMO:n asettamien päästörajoitusten vuoksi.

IMO:n asettamat kansainväliset rajoitukset ovat tähän mennessä kohdistuneet lähinnä merkittävimpien päästökomponenttien, typen ja rikin oksidien, hillitsemiseen. Tämä on ollut ensiaskel kohti kestävämpää liikennöintiä merellä. Seuraavassa isommassa askeleessa kohditi päästötöntä meriliikennettä tavoitellaankin merkittävästi pienempiä hiilidioksidipäästöjä. IMO:n 2010-luvulla luomat energiatehokkuuteen ohjaavat ohjelmat EEDI ja SEEMP luovat hyvän pohjan lähitulevaisuuden uusille kansainvälisille säädöksille, joilla pyritään minimoimaan risteilyalusten CO₂-päästöjä.

Tiukentuneiden päästörajoitusten voidaan nähdä korreloivan suoraan risteilyalusten energiajärjestelmiin. Perinteisesti laivaliikenteessä poltettavan HFO:n rinnalle on noussut vaihtoehtoisia polttoaineita. Risteilyalukset hakevat vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarvittavien päästörajoitusten saavuttamista. Risteilyalusten toimiessa tiukemmilla päästöalueilla vaihtoehtona on ollut joko käyttää vähärikkisempiä polttoaineita, esimerkiksi MGO:ta tai MDO:ta, tai vaihtoehtoisesti asentaa osaksi risteilyalusten energiajärjestelmiä tekniikkaa, jolla voidaan sitoa päästöjä, esimerkiksi rikkipesureita.

Raakaöljyn suhteellisen halvan hinnan vuoksi moni risteilevä risteilyalus on todennut kustannustehokkaimmaksi vaihtoehdoksi käyttää HFO:ta polttoaineena ja rikkipesuria rikkioksidien hillintään ainakin parhaillaan käytössä olevan kaluston kohdalla. Uuden rakennettavan kaluston kohdalla LNG:n käyttäminen polttoaineena nähdään lupaavana, koska sen aiheuttama ympäristökuorma on kevyempi kuin HFO:n. Ensimmäisistä LNG:llä risteilevistä aluksista on saatu positiivisia kokemuksia, vaikka LNG:n käyttäminen polttoaineena vaatiikin teknisesti hiukan monimutkaisempaa kalustoa. Isoimpana haasteena LNG:n käytön yleistymisellä on nähty keskeneräinen jakeluverkko ja siihen liittyvät investoinnit, mutta viime aikoina etenkin länsimaiden alueille on suunniteltu merkittävä määrä uusia LNG-terminaaleja ja lähivuosisikymmenien aikana terminaalien määrä tulee todennäköisesti mo-

ninkertaistumaan. Jakeluverkon muodostuminen yhä laaja-alaisemmaksi tulee lisäämään LNG:llä operoivien aluksien määrää.

Perinteisesti risteilyalusten energianlähteinä ovat olleet suuren kokoluokan hidas- ja keskinopeakäyntiset dieselmoottorit. Risteilyalusten energiantuotantokokonaisuus muodostuu useasta erillisestä moottoriyksiköstä. Kyseisellä järjestelyllä pystytään tuottamaan energiaa mahdollisimman optimaalisesti sen mukaan, minkä verran risteilijä sitä tarvitsee milläkin hetkellä. Huomattavana muutoksena risteilyaluksien moottoriteknisissä asioissa voidaan pitää dual-fuel-moottoreiden yleistymistä. LNG:n yleistyminen on luonut tarpeen moottoreille, joissa pystytään käyttämään sekä nestemäisiä että kaasumaisia polttoaineita. Tämä luo joustavuutta risteilyaluksen toiminnalle sen mukaan, missä risteilyalus operoi maantieteellisesti sekä mitä polttoainetta on saatavilla ja mihin hintaan.

Propulsiovoiman tuotossa ollaan siirrytty yhä enenevässä määrin osittain tai kokonaan kohti sähkömoottoreiden käyttöä. Risteilyaluksessa sähköä tarvitaan myös merkittävästi asiakasviihtyvyyden luomiseen, joten sähkön tuottamisen keskitetysti on todettu olevan energiatehokkain vaihtoehto. Lisäksi siirtymällä perinteisestä mekaanisesta peräsin-potkuri-propulsiovoiman tuotosta sähköllä toimiviin Azipod-ruoripotkuri yksiköihin saavutetaan jopa 20% parempia hyötysuhteita.

Dieselmoottoreiden hyötysuhteen ollessa noin 50% kokoluokkaa korostuu hukkaenergiavirtojen tehokas hyödyntäminen tavoiteltaessa mahdollisimman energiatehokkaita kokonaisuuksia. Risteilyaluksissa savukaasujen ja moottoreiden jäähdytysvesien exergiaa hyödynnetään käytännössä sitä tehokkaammin, mitä uudempi risteilyalus on kyseessä. Työn edetessä todettiin, että viime vuosikymmenien saatossa ollaan opittu hyödyntämään etenkin savukaasujen mukana poistuvaa hukkalämpöä yhä tehokkaammin. Risteilyalusten lämmitysjärjestelmän keskiössä ovat savukaasukattilat, joissa tuotetaan höyryä laivan lämmitystarpeisiin dieselmoottoreiden savukaasuista. Lisäksi risteilijät on varustettu erillisillä lämmitykseen tarkoitetuilla höyrykattiloilla, joilla voidaan tasata kulutuspiikkejä esimerkiksi talvella kovilla pakkasilla ja turvata satamassaoloaikaanakin riittävä lämmönsaanti silloin, kun suurin osa moottoreista on suljettuna ja savukaasuista saatavaa lämpöä on vähemmän tarjolla.

Moderneihin risteilyaluksiin on alettu asentamaan lämpövarastoja osaksi lämmitysjärjestelmiä siitä syystä, että suhteellisen suurilla nopeuksilla merellä operoitaessa savukaasujen

lämpöä on ylen määrin tarjolla. Lämpövarastojen avulla osa tästä ylimääräisestä lämmöstä pystytään varastoimaan satamassaoloa varten, jolloin erillisten höyrykattiloiden polttamisen tarve vähenee. Tällöin säästetään polttoainetta, toisin sanoen rahaa, ja ympäristöä. Modernin 2010-luvulla rakennetun risteilyaluksen kokonaan hukkaan menevät energiavirrat saattavat olla jopa neljä kertaa pienemmät kuin esimerkiksi 1990-luvulla rakennetun risteilyaluksen.

Risteilyalusteollisuus on voimakkaasti kehittyvä ala, joka pyrkii IMO:n johdolla kohti päästötöntä liikennöintiä vuosisadan loppuun mennessä. Pyrkimys kohti päästötöntä liikennöintiä tulee muovaamaan entisestään risteilyalusten energiajärjestelmiä. Käynnissä oleva murros koskien päästöjen hillitsemistä on johtanut alkavaan polttoainemurrokseen sekä päästöjärjestelmien tulemiseen osaksi risteilyalusten energiajärjestelmiä. Tulevaisuudessa energiatehokkuuden säätelyyn tullaan kansainvälisellä tasolla kiinnittämään entistä enemmän huomiota. Tällä pyritään minimoimaan alusten polttoaineenkulutus ja täten minimoimaan hiilidioksidipäästöt. Energiatehokkuuden tehostamisella pyritään laivan mahdollisimman korkeaan kokonaishyötysuhteeseen, joka puolestaan luo tarpeen entistä energiatehokkaimmille osakokonaisuuksille laivojen energiajärjestelmissä.

LÄHDELUETTELO

Abadie, Luis María; Goicoechea, Nestor. 2019. Powering newly constructed vessels to comply with ECA regulations under fuel market prices uncertainty: Diesel or dual fuel engine? *Transportation Research Part D*, Vol 67. Elsevier BV. 433-448. ISSN 1361-9209.

ABB. 2009. ABB Azipod units propel the world's largest cruise ship across the Atlantic. [ABB:n [www-sivut](http://www.sivut)] [Viitattu 08-01-2019] Saatavissa: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/6e198d989e3b9cbbc125766c004dd905.aspx>

ABB. 2016. ABB introduces the world's most efficient electric propulsion system for marine vessels. [ABB:n [www-sivut](http://www.sivut)] [Viitattu 11-1-2019]. Saatavissa: <http://www.abb.com/cawp/seitp202/b92124f0aaca3be8c125802100467a93.aspx>

Ahtila, Pekka; Lappalainen, Jari; Lepistö, Vesa; Sillanpää, Kari. 2016. Dynamic process simulation promotes energy efficient ship design. *Ocean Engineering*. Ocean Engineering, Vol 111. Elsevier BV. 43-55. ISSN 0029-8018.

Ammar, Nader R.; Seddiek, Ibrahim S. 2017. Eco-environmental analysis of ship emission control methods: Case study RO-RO cargo vessel. *Ocean engineering*, Vol 137. Elsevier BV. 166-173. ISSN 0029-8018.

Balcombe, Paul; Brierley, James; Chester, Lewis; Hawkes, Adam; Skatvedt, Line; Speirs, Jamie; Staffell, Iain. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. 2019. *Energy Conversion and Management*, Vol 182. Elsevier BV. 72-88. ISSN 0196-8904.

Ahlgren, Fredrik; Baldi, Francesco; Nguyen, Tuong-Van; Thern, Marcus. Andersson Karin. 2018. Energy and exergy analysis of a cruise ship. *Energies*, Vol 11. MDPI AG. ISSN 1996-1073.

Baldi, Francesco; Gabrielli, Cecelia; Melino, Francesco; Bianchi, Michele. 2015. A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*, Vol 75. Elsevier BV. 2169-2174. ISSN 1876-6102.

Burel, Fabio; Taccani, Rodolfo; Zuliani, Nicola. 2013. Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy* Vol 57. Elsevier BV. 412-420. ISSN 0360-5442.

Demirbas, Ayhan. 2010. Methane gas hydrate. Springer-Verlag. ISSN 1865-3529.

Chanev, Chavdar. 2015. RMS Queen Mary 2 ship. [Queen Mary Cruises [www-sivut](http://www.sivut)] [Viitattu 11-01-2019]. Saatavissa: <http://www.queenmarycruises.net/rms-queen-mary-2-ship/>

Climeon. How it works. [Climeonin [www-sivut](http://www.sivut)] [Viitattu 05-03-2019]. Saatavissa: <https://climeon.com/how-it-works-detailed/>

- Climeon. 2017. Technical product sheet. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 05-03-2019]. Saatavissa: <https://climeon.com/wp-content/uploads/2017/04/Climeon-Tech-Product-Sheet.pdf>
- European Commission, 2013. [Lehdistötiedote] [Viitattu 08-04-2019]. Saatavissa: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-13-40_en.htm
- 2016/802/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 11.05.2016 tiettyjen nestemäisten polttoaineiden rikkipitoisuuden vähentämisestä. Euroopan unionin virallinen lehti N:o 132, 21.05.2016.
- Forsman, Jami. 2017. Rikkipesurin kokonaisinvestointikustannukset ja takaisinmaksuaika. Opinnäytetyö. Turku AMK. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 16-03-2019]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/141007/Forsman_Jami.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hansen, Jan Fredrik; Wendt, Frank. 2015. History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends. Proceedings of the IEEE, Vol 13. IEEE. 2229-2242. ISSN 0018-9219.
- Hiereth, Hermann; Prenninger Peter. 2003. Charging the Internal Combustion Engine. Springer-Verlag. ISSN 1613-6349.
- Hochberg, Matt. 2017. Royal Caribbean Blog - 7 things you might not know about Royal Caribbean's Oasis of the Seas. [Royal Caribbean Blog www-sivut] [Viitattu 02-04-2019]. Saatavissa: <https://www.royalcaribbeanblog.com/2017/10/01/7-things-you-might-not-know-about-royal-caribbeans-oasis-of-the-seas>
- Hyttiäinen, Kalle. 2012. Laivan sähköverkon simulointi. Diplomityö. Aalto yliopisto. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 23-02-2019]. Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Dipl/2012/urn100586.pdf>
- IMO. 2018a. Marine Environment Protection Committee (MEPC), 72nd session, 9-13 April 2018. [IMO:n www-sivut] [Viitattu 2018-11-15]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MEPC/Pages/MEPC-72nd-session.aspx>
- IMO. 2018b. Energy Efficiency Measures. [IMO:n www-sivut] [Viitattu 2018-12-01]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/ourwork/environment/pollutionprevention/airpollution/pages/technical-and-operational-measures.aspx>
- IMO. 2017. Marine Environment Protection Committee (MEPC), 71st session – Media information. [IMO:n www-sivut] [Viitattu 2018-11-30]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/mediacentre/imomediaaccreditation/pages/mepc71preview.aspx>
- International Gas Union. 2018. 2018 World LNG Report. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 05-01-2019]. Saatavissa: https://www.igu.org/sites/default/files/node-document-field_file/IGU_LNG_2018_0.pdf

Condra, Thomas; Kyriakidis, Fotis; Sørensen, Kim; Singh, Shobhana. 2017. Modeling and optimization of integrated exhaust gas recirculation and multi-stage waste heat recovery in marine engines. *Energy Conversion and Management* Vol 151. Elsevier BV. 286-295. ISSN 0196-8904.

Lamminen, Johanna. 2017. Gasum. Muuttaako LNG Suomen ja Pohjoismaiden energiamaarkkinaa? [Verkkajulkaisu] [Viitattu 2018-12-01]. Saatavissa: https://energia.fi/files/1616/Muuttaako_LNG_Suomen_ja_Pohjoismaiden_energiamaarkkinaa_Lamminen_Gasum.pdf

Mak, John Y.; Mokhatad, Saeid; Valappil, Jaleel V.; Wood, David A. 2014. *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Elsevier Inc. ISBN 978-0-12-404585-9.

Marine Log. 2017. Moving on LNG. *Marine Log* Vol 122. Simmons-Boardman. 36-37. ISSN 08970491.

MTCC Latin America. 2018. Alternative fuels and energy efficiency for the shipping industry. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 16-03-2019]. Saatavissa: <https://gmn.imo.org/wp-content/uploads/2018/01/AnnexV-2-5-Alternative-Fuels-and-Energy-Efficiency.pdf>

Oates, Carroll. 1998. When marine gas turbine systems make sense. *International Cruise & Ferry Review*. Euromoney Institutional Investor PLC. ISSN 09554408.

Alhosalo, Minna; Erkkilä-Välimäki, Anne; Haavisto, Riina; Haukioja, Teemu; Jalkanen, Jukka-Pekka; Kiiski, Tuomas; Lensu, Mikko; Niemi, Janne; Ojala, Lauri; Pohjola, Tuomas; Pöntynen, Riitta; Repka, Sari; Solakivi, Tomi. 2017. Merenkulun kansainvälisen ilmastojä ja ympäristösäätelyn vaikutukset Suomen elinkeinoelämälle. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta. [Verkkajulkaisu] [Viitattu 2018-11-20]. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80283/55_Mersu_.pdf

Trafi. 2018. Päästöt ilmaan. [Trafin www-sivut] [Viitattu 2018-11-24]. Saatavissa: https://www.trafi.fi/merenkulku/ymparistoasiat/paastot_ilmaan

VTT. 2004. *Energia Suomessa*. Helsinki: Edita Prima Oy, 3.painos.

Wärtsilä. 2019a. Wärtsilä 46F. [Wärtsilän www-sivut] [Viitattu 04-01-2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/diesel-engines/wartsila-46f>

Wärtsilä. 2019b. Wärtsilä Transverse Thrusters. [Wärtsilän www-sivut] [Viitattu 08-01-2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/propulsors-gears/thrusters/wartsila-transverse-thrusters>

Wärtsilä. 2019c. Wärtsilä 46DF. [Wärtsilän www-sivut] [Viitattu 11-1-2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-46df>

Wärtsilä. 2019d. NOx Reducer (NOR). [Wärtsilän www-sivut] [Viitattu 18-03-2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/exhaust-gas-cleaning/nox-abatement/wartsila-nox-reducer-nor>

Wärtsilä. 2017a. SOx Scrubber Technology, Product guide. [Verkojulkaisu] [Viitattu 16-03-2019]. Saatavissa: <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-sox-scrubber-tech.pdf>

Wärtsilä. 2017b. NOx Reducer, Product Leaflet. [Verkojulkaisu] [Viitattu 18-03-2019]. Saatavissa: <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/brochure-o-env-wartsila-nox-reducer.pdf>

Wärtsilä. 2009. Wärtsilä powers Royal Caribbean's Oasis of the Seas – The largest and most revolutionary cruise ship in the world. [Wärtsilän www-sivut] [Viitattu 04-01-2019]. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/media/news/28-10-2009-wartsila-powers-royal-caribbean's-oasis-of-the-seas-the-largest-and-most-revolutionary-cruise-ship-in-the-world>