

Jouni Rinta-aho

RIKKIDIREKTIIVIN AIHEUTTAMAT MUUTOKSET
MATKUSTAJA-ALUKSELLA

Merenkulun insinöörin koulutusohjelma
2014

RIKKIDIREKTIIVIN AIHEUTTAMAT MUUTOSTYÖT MATKUSTAJA-
ALUKSELLA

Rinta-aho, Jouni
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Merenkulun insinöörin koulutusohjelma
joulukuu 2014
Ohjaaja: Haapanen, Toni
Sivumäärä: 33
Liitteitä:

Asiasanat: Rikkipäästöt, polttoaineet,

Tammikuun ensimmäisenä päivänä 2015 astuu voimaan uudet rikkipäästömääräykset, jotka rajoittavat rikin oksidien määrän pakokaasuissa itämeren alueella 0,1 painoprosenttiin vielä voimassa olevan 1 painoprosentin sijaan.

Opinnäytetyöni tarkoituksena on tutkia millaisilla eri vaihtoehdoilla on mahdollista saavuttaa asetettujen määräysten mukaiset rikin oksidi päästöt. Tutkimuksessani keskitytään Tallink Silja Oy:n M/S Silja Serenade alukseen. Tavoitteena oli löytää Serenadelle parhaiten sopiva ratkaisu, jolla aluksen rikin oksidien määrä saadaan sallitulle tasolle.

Parhaaksi vaihtoehdoksi rikin oksidien vähentämiseksi todettiin kevyen polttoaineen käyttöönotto. Opinnäytetyön loppuosassa käsitellään kevyen polttoaineen käyttöönotosta johtuvia ongelmia ja tarvittavia muutostöitä.

MODIFICATIONS ON A PASSENGERSHIP CAUSED BY SULFUR EMISSION DIRECTIVE

Rinta-aho, Jouni

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in maritime engineering

December 2014

Supervisor: Haapanen, Toni

Number of pages: 33

Appendices:

Keywords: marine fuel oils, sulfur emissions.

January 1st 2015 new sulfur emission regulations will come into force. According to new regulations sulfur dioxide content in flue gases will be reduced from 1% to 0,1%.

The purpose of this thesis is to research what kind of solutions there are to achieve allowed levels of sulfur dioxide. This research is focused on Tallink Silja's Vessel M/S Silja Serenade. My most important target was to best solution for Serenade to get her Sulfur dioxide requisite levels.

The best alternative to reduce sulfur dioxide emissions at Serenade was found to be switching heavy fuel oil to light fuel oil. End part of thesis is about light fuel oil-related problems and necessary modifications.

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄÄDÖKSET	7
2.1	IMO	7
2.1.1	Marpol	7
2.1.2	Marpol Annex VI	8
2.1.3	SECA-alueet	9
2.2	Eu-direktiivit	10
2.3	Suomen laki.....	10
3	RATKAISUVAIHTOEHDOT	11
3.1	Rikkipesurit	11
3.1.1	Suljetun kierron rikkipesurit.....	11
3.1.2	Avoimen kierron rikkipesurit	12
3.1.3	Hybridi pesuri	14
3.2	Maakaasu.....	14
3.2.1	Sg-moottorit.....	14
3.2.2	Dual fuel moottorit	15
3.2.3	Diesel-kaasumoottorit.....	16
3.2.4	Maakaasun säilytys.....	17
3.3	Vaihtoehtoiset polttoaineet.....	17
4	KEVYEESEEN POLTTOAINEESEEN SIIRTYESSÄ HUOMIOITAVAT ASIAT	18
4.1	Polttoaineen liiallinen lämpeneminen	18
4.1.1	Polttoaineen lämpeneminen polttoainepumpuissa	19
4.2	Separattorin ominaispainolevyn vaihto	21
4.2.1	ALCAP separaattori	22
4.3	Polttoainepumppujen huono voitelu.....	23
4.4	Polttoainesuodattimien tukkeutuminen	24
4.5	Bunkrauksen vaikeutuminen	24
5	KEVYEN POLTTOAINEEN HYÖDYT	24
5.1	Huoltovälien muutokset	25
6	MUUTOSTYÖT	25
6.1	Polttoainetankkien puhdistus.....	25
6.2	Polttoaineen jäähdytin	25
6.2.1	jäähdyttimen mitoitus	26
6.2.2	jäähdyttimen asennus.....	30
6.3	Pakovalvontavaihto	31

7 YHTEENVETO	32
LÄHTEET	33

LYHENTEET

DMB	Distillate Marine Fuel lyhenteen B kuvaa polttoaineen viskositeettia
HFO	Heavy Fuel Oil raskas polttoaine
IMO	International maritime organisation, kansainvälinen merenkulun järjestö
LT-vesi	Low Temperature, Matalan lämpötilan jäähdytysvesi
Marpol	Maritime pollution, IMO:n ympäristönsuojelun yleissopimus
MDO	Marine Diesel Oil
MGO	Marine Gas Oil
SECA	Sulphur emission control area, Marpolissa määritellyt tiukempien rikkipäästörajoitusten alueet
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption Ilmaisee kuinka paljon polttoainetta kuluu yhtä kilowattituntia kohden g/kWh

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni aiheena on rikkidirektiivin vaikutukset matkustaja-aluksessa. Tarkastelen työssäni Tallink Silja Oy:n omistamaa M/S Silja Serenadea. Silja Serenade on Helsinki-Tukholma reitillä liikennöivä matkustaja-autolautta. Serenade on valmistunut 1990 Masa Yardsin telakalta. Serenadeen mahtuu 2852 matkustajaa ja autokannelle 950 metriä lastia. Serenaden lippuvaltio on Suomi ja kotisatama Maarianhamina. Serenaden pääkoneina on 4X Wärtsilä Vasa 9L46 yhteisteho 32.500 kW.

Tammikuun ensimmäisenä päivänä 2015 astuu voimaan rikkidirektiivin (2012/33EU), mukaiset päästörajoitukset, jotka rajoittavat itämeren alueella liikennöivien alusten rikkipäästöt 0,1 painoprosenttiin vielä voimassa olevan 1 painoprosentin sijaan. Tässä työssäni kerron millaisilla eri ratkaisuilla on mahdollista saavuttaa asetetut päästövaatimukset.

Rikkipäästöt johtuvat käytössä olevan raskaan polttoaineen korkeasta rikkipitoisuudesta, joka palaessaan muodostaa rikin oksideja. Vaihtoehtoina on matalarikkiseen polttoaineeseen siirtyminen, maakaasun käyttöönotto tai rikin oksidien peseminen pakokaasuista rikkipesurilla. Kaikissa tapauksessa joudutaan tekemään mittavia muutostöitä.

Opinnäytetyöni koostuu rikkisäädösten ja ratkaisuvaihtoehtojen käsittelystä sekä muutostöiden suunnittelusta. Tavoitteena on löytää paras mahdollinen ratkaisu, jolla aluksen päästöt saadaan asetettuihin rajoihin. Pääpainona työssäni on matalarikkiseen polttoaineeseen siirryttäessä huomioitavat asiat.

Työssäni keskityn ainoastaan teknisiin asioihin ja siinä ei käsitellä taloudellisia vaikutuksia.

2 SÄÄDÖKSET

IMO on laatinut merenkulun ilmansuojelua koskevan yleissopimuksen Marpol konvention kuudenneksi liitteeksi. Yleissopimuksessa rajoitetaan Itämerellä liikennöivien alusten rikkipäästöt 0,1 painoprosenttiin 1.1.2015 alkaen. Eu-direktiivissä 2012/33/EU vahvistetaan marpolin mukaiset päästörajoitukset ja määrätään, että jäsenvaltioiden on saatettava asetukset lainvoimaan 18.6.2014 mennessä

2.1 IMO

International Maritime Organisation (IMO) on Yhdistyneiden kansakuntien alaisuudessa toimiva kansainvälinen merenkulun järjestö, joka valvoo merenkulun turvallisuutta, koulutusta ja luonnonsuojelua. IMO on perustettu 1948 ja sen pääkonttori on Lontoossa. Nykyisin siihen kuuluu 170 jäsenvaltiota. IMO laatii yhteisiä pelisääntöjä kansainväliseen merenkulkuun. Eräs IMO:n konventioista on MARPOL (Marine Pollution). (IMO. 2014)

2.1.1 Marpol

Marpol (Marine pollution) on ympäristön suojeluun liittyvä yleissopimus, jonka ensimmäinen liite laadittiin 1973. Vuonna 1978 sopimukseen tehtiin muutoksia. Marpol (73/78) astui voimaan 2.10.1983 ja se käsitteli öljyvahinkojen aiheuttamia saastumisien ehkäisyä. Marpol koostuu kuudesta liitteestä, jotka kukin käsittelevät ympäristön suojeluun liittyviä osioita. (IMO. 2014)

Taulukko 1 Marpolin liitteet ja voimaantuloajat.

Liite	Liitteen sisältö	voimaantuloaika
Annex I	Määräys öljyn aiheuttamien saastuttamisen vähentämiseksi	2.10.1983
Annex II	Määräys haitallisten nesteiden käsittelystä	6.4.1987
Annex III	Määräys haitallisten aineiden pakkauksesta	1.7.1992
Annex IV	Määräys laivan jätevesien käsittelystä	27.9.2003
Annex V	Määräys laivan jätteiden käsittelystä	31.12.1988
Annex VI	Määräys ilman saasteiden vähentämiseksi	19.5.2005

2.1.2 Marpol Annex VI

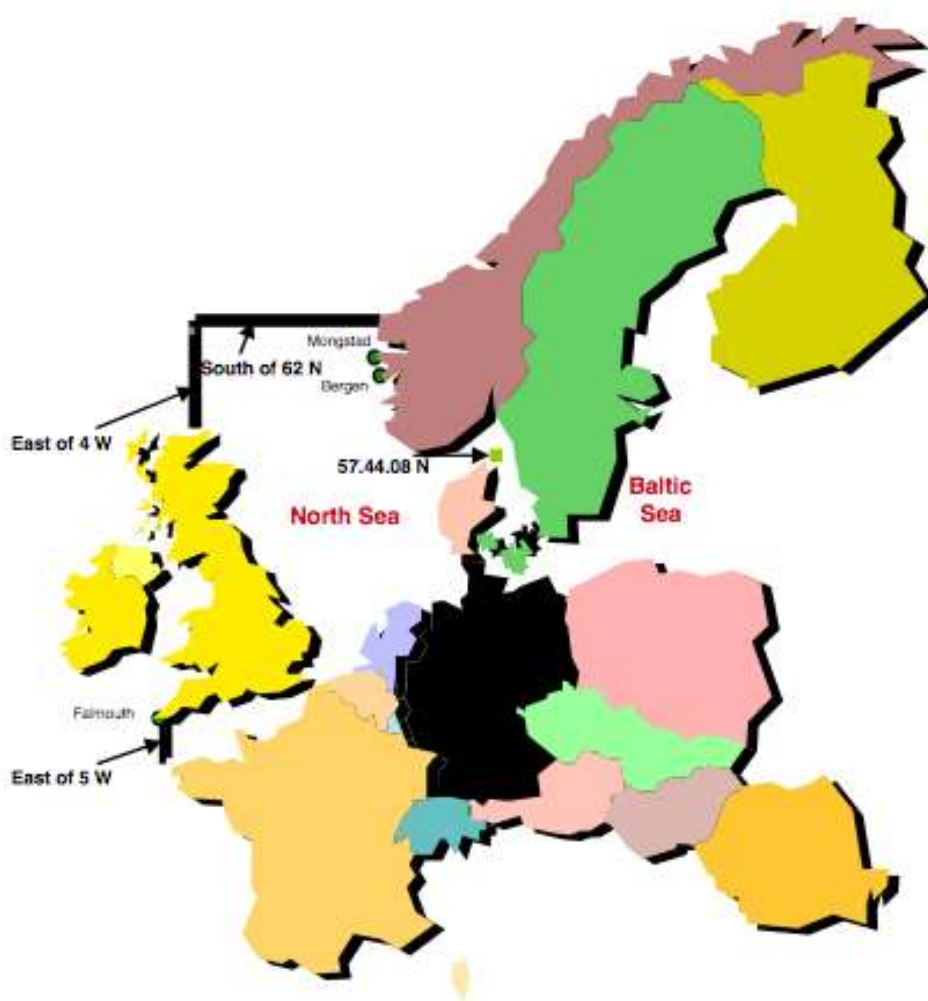
Marpol Annex VI on IMO:n laatima ilmastonsuojelusopimus, jossa on määritelty sallitut rikkipäästöt eri vesialueilla. Lisäksi liite käsittelee typen oksidipäästöjä Annex VI astui voimaan toukokuussa 2005. Sopimuksessa määritellään rikkipäästöjen vähentämisaikataulu sekä niin sanotut SECA-alueet. (Sulphur Emission Control Areas).(IMO. 2014)

Taulukko 2 Annex VI Voimaanastumisaikataulu eri alueilla

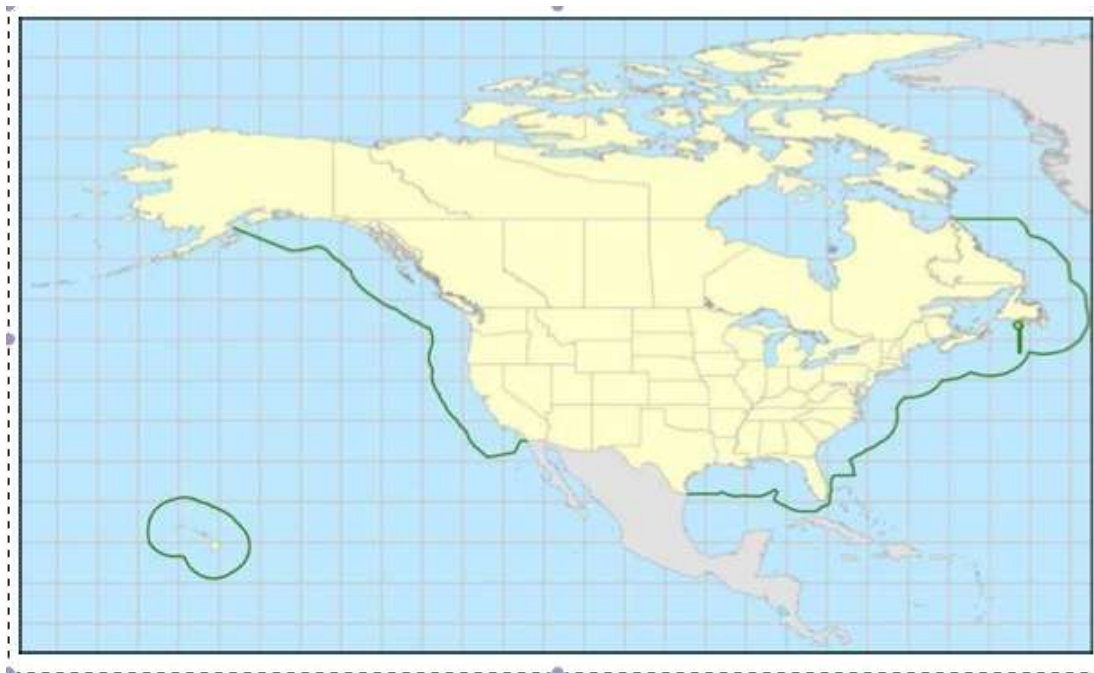
Voimaantulopäivä	Alustyyppi	Alue	%	Säädöksen laatija
19.5.2006	kaikki	Itämeren SECA alue	1,5	Marpol
11.8.2006	kaikki	Itämeren SECA alue	1,5	EU
11.8.2006	matkustaja- alukset	Kaikkialla EU:n alueella	1,5	EU
11.8.2007	kaikki	Pohjan meri ja Englannin kanaali	1,5	EU
22.11.2007	kaikki	Pohjan meri ja Englannin kanaali	1,5	Marpol
1.1.2008	kaikki	Kaikkialla EU:n alueella	0,1	EU
1.1.2010	kaikki	Kaikkialla EU:n satamissa	0,1	EU
1.1.2010	sisävesi laivat	EU:n sisävesialueilla	0,1	EU
1.7.2010	kaikki	SECA:alueet	1	Marpol
1.1.2012	kreikkalaiset alukset	Kreikan satamat	0,1	EU
1.1.2012	kaikki	Maailmanlaajuisesti	3,5	Marpol
1.1.2015	kaikki	SECA:alueet	0,1	Marpol
1.1.2020	kaikki	Maailmanlaajuisesti	0,5	Marpol

2.1.3 SECA-alueet

Marpol VI määrittelee SECA-alueet (Sulphur Emission control areas), joissa rikkisäädökset astuvat voimaan tiukempana ja nopeutetulla aikataululla. SECA-alueisiin kuuluu Itämeri, pohjan meri, Englannin kanaali sekä Yhdysvaltojen ja Kanadan rannikot.



Kuva 1 SECA-alueet. Wärtsilä 2009



Kuva 2 Pohjois-Amerikan SECA-Alueet. Wärsilä 2009

2.2 Eu-direktiivit

Lopullinen meriliikenteen päästöjä koskeva Eu-direktiivi (2012/33/EU) julkaistiin 21.11.2012 kun sopu komission, neuvoston ja Euroopan parlamentin välillä oli saatu aikaan. Direktiivi sisältää Marpol Annex VI yleissopimuksen rikkipäästöjä koskevat määräyksen. Direktiivissä määrätään, että jäsenvaltioiden on saatettava voimaan direktiivin (2012/22/EU) noudattamisen edellyttämät lait, asetukset ja hallinnolliset määräyksen viimeistään 18.6.2014. (shipowners 2012)

2.3 Suomen laki

Suomessa on saatettu voimaan merenkulun ympäristönsuojelu laki (1672/2009), jonka mukaan Suomalaisten alusten on noudatettava Suomen aluevesillä, talousalueella ja niiden ulkopuolella MARPOL 73/78 – yleissopimuksessa määritellyjä päästörajoi-
tuksia. (merenkulun ympäristönsuojelulaki 1672/2009 6§)

3 RATKAISUVAIHTOEHDOT

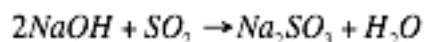
Säädösten mukaisiin päästöihin pääsemiseen on olemassa kolme ratkaisuvaihtoehtoa rikkipesurin asennus, maakaasun käyttöönotto ja vähärikkiseen polttoaineeseen siirtyminen.

3.1 Rikkipesurit

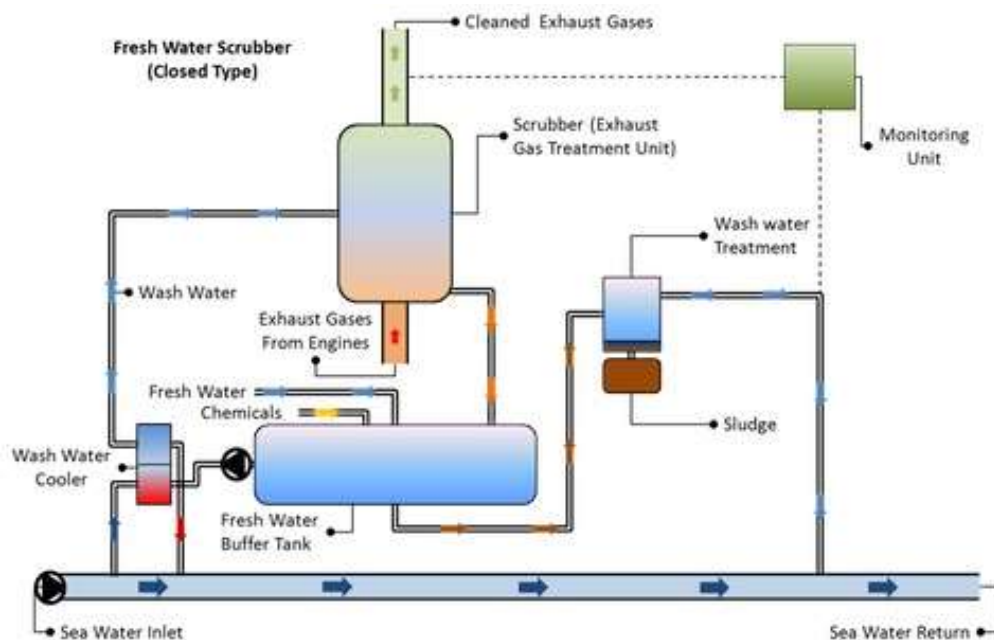
Rikkipesurin asennus on yksi keino saada rikkipäästöt asetettuihin arvoihin. Rikkipesuri on laite, joka pesee rikin oksidit pakokaasuista. Rikkipesurin asennuksella välttäisiin polttoaineen vaihdokselta. Rikkipesurilaitteistoja on markkinoilla kolmea eri tyyppiä. Suljetun kierron ja avoimen kierron järjestelmiä sekä hybridipesureita, joissa on yhdistetty avoin ja suljettu kierto.

3.1.1 Suljetun kierron rikkipesurit

Suljetulla kierrolla toteutetut järjestelmät käyttävät teknistä vettä pakokaasun pesuun. Teknisen veden sekaan annostellaan alkalista ainetta useimmiten natriumhydroksidia (NaOH). Natriumhydroksidi sitoo rikin oksidit itseensä alla olevan reaktioyhtälön mukaisesti. Tuloksena on natriumsulfiittia ja vettä.



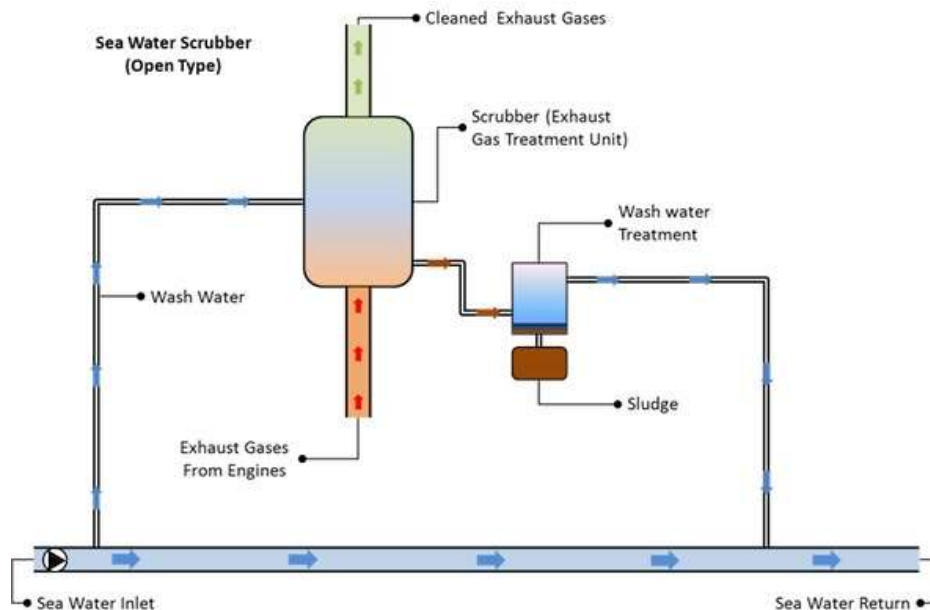
Scrubberista pesuvesi palaa puskuritankkiin. Puskuritankista osa vedestä palaa jäädytyksen jälkeen takaisin kiertoon ja osa vedenkäsittely-yksikön kautta mereen ja sludgetankkiin. (Bureau Veritas. 2012)



Kuva 3 Rikkipesuri suljettu kierto. Shippipedia 2013

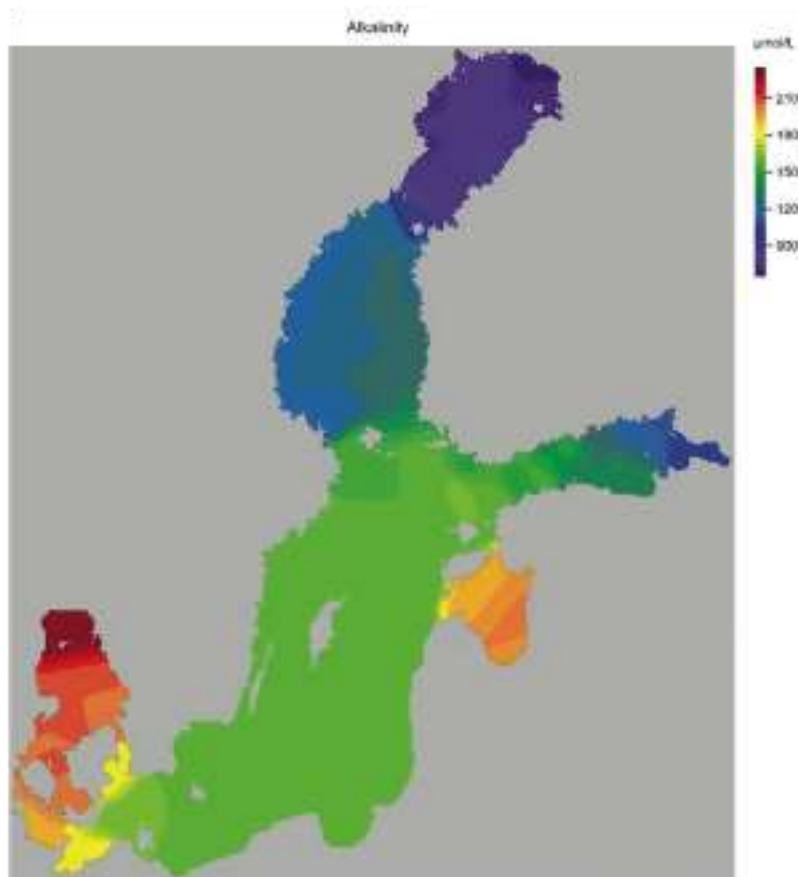
3.1.2 Avoimen kierron rikkipesurit

Avoimen kierron rikkipesurit käyttävät toimiakseen merivettä. Merivesi pumpataan merivesikaivosta ja johdetaan scrubberiin. Vesi ruiskutetaan pakokaasun sekaan scrubberissa. Merivesi reagoi pakokaasujen kanssa muodostaen rikkihappoa. Scrubberista vesi siirtyy veden käsittely-yksikölle, joka päästää puhtaan meriveden takaisin mereen ja siirtää likaisen veden sludgetankkiin. Avoimen kierron rikkipesurissa ei pesuveteen tarvitse lisätä kemikaaleja, koska merivesi sisältää luonnostaan alkaleja, jotka neutraloivat pesussa muodostuvat rikkihapot. (Bureau Veritas. 2012)



Kuva 4 Avoin kierto rikkipesuri. Shippipedia 2013

Avoimen kierron pesuri vaatii toimiakseen merivettä, jonka alkalipitoisuus on vähintään $1000 \mu\text{mol/L}$. Alla olevasta kuvasta voidaan todeta, että Itämeren alkalipitoisuus on riittävä kaikkialla muualla paitsi Pietarin edustalla ja merenkurkun pohjoispuolella. (Bureau Veritas 2012)



Kuva 5 Itämeren veden alkalipitoisuus. Wärtsilä 2009

3.1.3 Hybridi pesuri

Hybrid-pesuri toiminta perustuu avoimen ja suljetun kierron pesureiden yhdistelyyn. Pesuri toimii veden alkalipitoisuuden salliessa merivedellä ja alkalitason laskiessa liian matalaksi veteen lisätään kemikaaleja. Hybridpesuri sopii asennettavaksi aluksiin, joiden liikennealueisiin kuuluu merien lisäksi sisävesi- ja murtovesi alueet, joiden veden alkaliteetti ei yllä riittävälle tasolle. (Bureau Veritas. 2012)

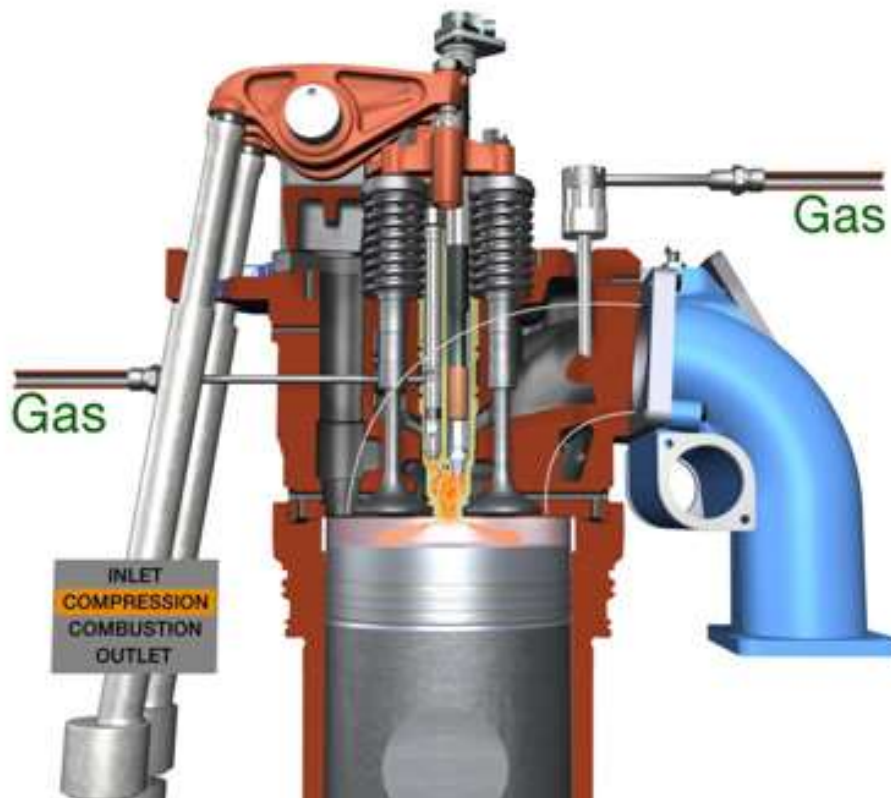
3.2 Maakaasu

Maakaasuun siirtyminen on yksi vaihtoehto, jolla rikki päästöt saadaan sääntöjen mukaisiin arvoihin. Maakaasu on metaania (CH₄), joka ei sisällä rikkiä. Metaania polttaessa ei siis synny rikkin oksideja. Wärtsilä valmistaa kolmea toiminnaltaan erilaista maakaasumoottoria. SG mallissa polttoaineena käytetään pelkästään maakaasua eikä se vaadi toimiakseen ollenkaan nestemäistä polttoainetta. Dual fuel ja diesel gas moottoreita voidaan käyttää sekä dieselillä että maakaasulla.

3.2.1 Sg-moottorit

Sg-moottorit toimivat normaalin nelitahtisen otto-moottorin prosessikierron mukaisesti. Imutahdin aikana moottorin imuventtiilit aukeavat ja sylinteriin pääsevän ilman joukkoon syötetään kaasua. Sylinterin kannen yläosassa on sytytystulppa ja sytytyskammio, johon johdetaan myöskin kaasua imutahdin aikana. Puristustahdin lopussa sytytyskammiossa oleva rikasseksinen kaasu sytytetään sähkökipinällä ja sylinterissä oleva ilman ja kaasun seos syttyy työntäen mäntää alaspäin. (Wärtsilä 2014)

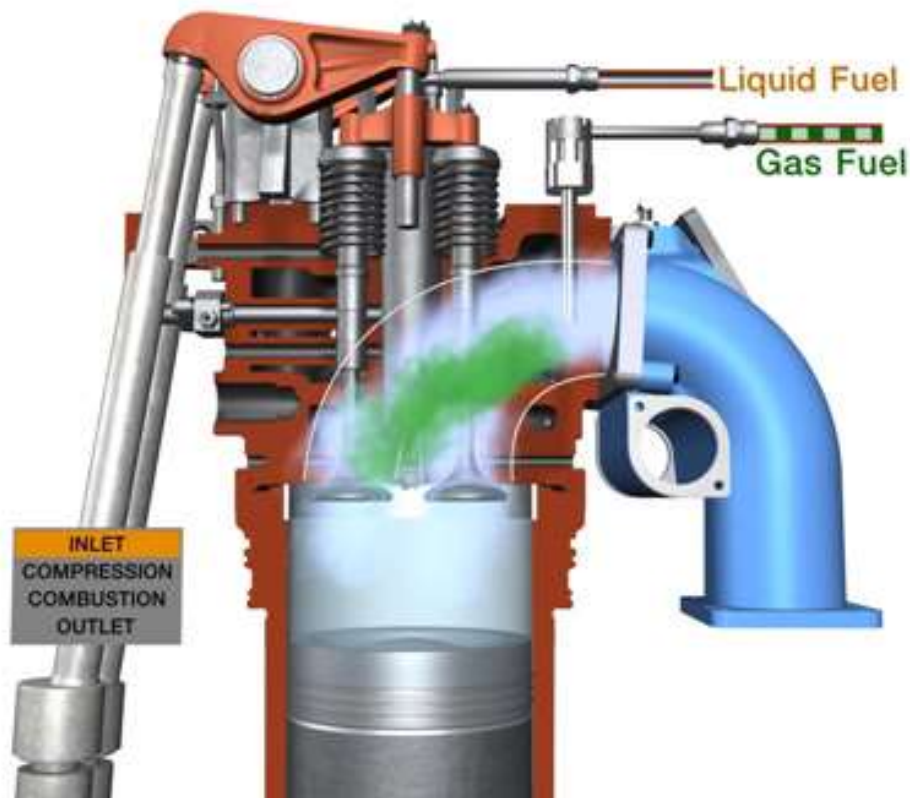
Sg- moottorit on suunniteltu käytettäväksi ainoastaan maakaasulla ja niitä ei voida käyttää kaasulla.



Kuva 6 Sg-moottori. Wärtsilä 2014

3.2.2 Dual fuel moottorit

Dual Fuel moottoreissa kaasua annostellaan imuilman joukkoon imutahdin aikana sg-moottorin tavoin. Dual fuel moottoreissa ei ole sytytystulppaa vaan kaasun ja ilman seos sytytetään syöttämällä pieni määrä korkeapaineista dieseliä palotilaan puristustahdin lopussa. Dual fuel moottorit on varustettu commonrail järjestelmällä, jolloin sytytykseen käytettävä polttoainemäärä saadaan mahdollisimman pieneksi ja ruiskutus-paine korkeaksi. Dual fuel moottoreita on mahdollista käyttää myös pelkällä dieselillä. Moottori on varustettu myös perinteisellä nokka-akselikäyttöisellä ruiskutus-pumpulla. (Wärtsilä. 2014)



Kuva 7 Dual fuel moottori. Wärtsilä 2014

3.2.3 Diesel-kaasumoottorit

Kolmas maakaasulla toimiva moottorityyppi on diesel-kaasumoottori. Diesel-kaasu moottoreissa sytytys tapahtuu ruiskuttamalla pieni määrä dieseliä palotilaan puristus-
 tahdin lopussa. Kun diesel on syttynyt sylinteriin päästetään kaasua, joka palaessaan
 painaa männän alas. Sytytykseen käytettävän dieselin osuus koko polttoainemäärästä
 on 5 % ja maakaasun osuus 95%. Diesel-kaasumoottoreita voidaan käyttää myös
 pelkästään dieselillä. (Wärtsilä. 2014)



Kuva 8 Diesel-kaasumoottori. Wärtsilä 2014

3.2.4 Maakaasun säilytys

Maakaasua säilytetään nestemäisessä muodossa, jolloin se vaatii tilaa noin 600 kertaa vähemmän kuin kaasuna. Pysyäkseen nesteenä maakaasun säilytyslämpötilana on $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tankeissa on kaksoiskuori, jonka sisemässä osassa säilytetään kaasua ja ulommassa osassa tiivistemateriaalia. Tankin hyvästä eristämisestä huolimatta kaasu pääsee lämpiämään ja alkaa höyrystyä. Tankki pysyy kylmänä, kun paine tankissa säilyy samana päästämällä höyrystynyt kaasu pois.

3.3 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Rikkipesurin asennus Serenadeen ei ole mahdollista laitteiston suuren tilantarpeen vuoksi. Lisäksi laitteisto asennetaan korkealle korsteeniin, joka aiheuttaisi liian suuren muutoksen aluksen vakavuuteen. Maakaasun käyttöönotto vaatisi aivan liian suuria investointeja ja hankalia muutostöitä. Maakaasun jakeluverkko on vielä liian rajallinen.

Paras mahdollinen vaihtoehto olisi jos löytyisi korvaava polttoaine, jonka viskositeetti ja ominaispaino olisivat samat kuin tällä hetkellä käytössä olevalla polttoaineella. Tällaisessa tapauksessa ei tarvittaisi mitään muutoksia. Raskasöljyn jalostaminen rikittömäksi on vielä liian kallista, joten tällä hetkellä tarjolla olevat vähärikkiset polttoaineet ovat tislattuja MDO ja MGO polttoaineita.

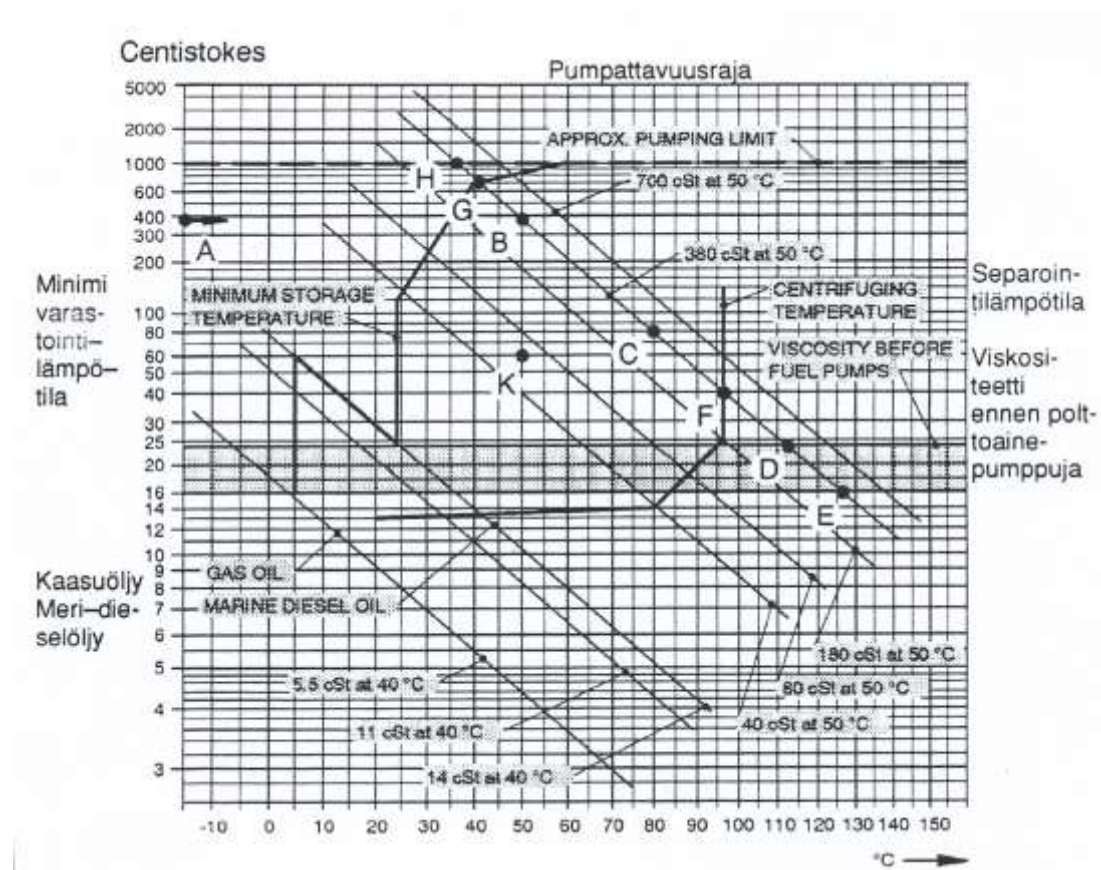
4 KEVYEESEEN POLTTOAINEESEEN SIIRTYESSÄ HUOMIOITAVAT ASIAT

Vähärikkiseen polttoaineeseen siirtyminen aiheuttaa lukuisia ongelmia, jotka on syytä ottaa huomioon muutostöitä suunniteltaessa. Wärtsilä 46 moottorit on suunniteltu toimimaan raskasöljyllä, joten kevyeen polttoaineeseen siirtyessä ei voida välttyä muutostöiltä. Ongelmia aiheuttaa MDO ja MGO polttoaineiden huomattavasti raskaita polttoaineita matalampi viskositeetti sekä ominaispainon pienuus.

4.1 Polttoaineen liiallinen lämpeneminen

Aluksen pääkoneet on suunniteltu toimimaan raskaalla polttoaineella. Raskasta polttoainetta käyttäessä on oleellista, että polttoaine lämmitetään korkeaan lämpötilaan viskositeetin alentamiseksi. Serenadella on käytössä raskas polttoaine, jonka viskositeetti on korkea matalassa lämpötilassa 380 cSt 50 °C. Polttoaineen ruiskutusta varten polttoaine on lämmitettävä korkeaan lämpötilaan 105 °C, jolloin sen viskositeetti alenee 20 cSt.

Korvaava polttoaine MDO DMB on puolestaan hyvin juoksevaa 40°C 3-11 cSt. Pääkoneiden valmistaja Wärtsilä on ilmoittanut että polttoaineen viskositeetti ennen ruiskutuspumppuja ei saa olla alle 2,8 cSt. Dieselin lämpötila saa siis olla korkeintaan 45°C ennen ruiskutuspumppuja.



Kuva 9 Viskositeetti diagrammi. Wärtsilä 2009

4.1.1 Polttoaineen lämpeneminen polttoainepumpuissa

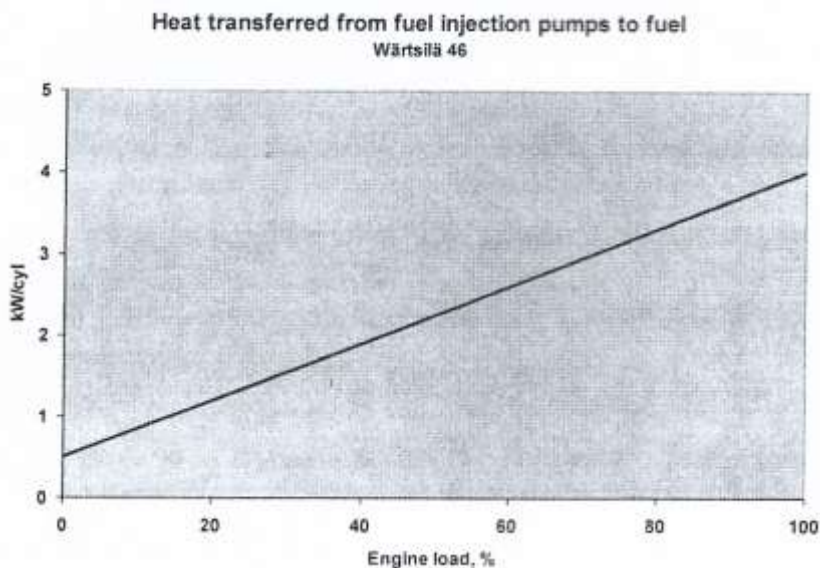
Serenadessa on neljä pääkonetta joiden polttoainejärjestelmät on jaettu kahdelle booster yksikölle. Pääkoneiden jako on tehty siten, että vaikka kumpi tahansa booster yksiköistä olisi poissa käytöstä, olisi silti mahdollista käyttää molempia potkuriakseleita. Toiseen yksikköön on liitetty pääkoneet 1 ja 4. Toiseen puolestaan pääkoneet 2 ja 3.

Polttoainetta pumpataan syöttöpumpulla päivätankista mixingtankkiin. Boosterpumppu pumppaa polttoaineen mixingtankista pääkoneille. Boosterpumppujen tuotto on 5,3 kuutiota tunnissa. Osa polttoaineesta ruiskutetaan ruiskutuspumpuilla koneeseen ja osa palaa takaisin mixingtankkiin ja sieltä uudelleen kiertoan.

Polttoaine sitoo lämpöä itseensä kuumista ruiskutuspumpuista sekä hotboxista. Mixingtankkiin palaava polttoaine on lämpimämpää kuin syöttöpumpulta tuleva. Tämä

puolestaan lämmittää koneiden ruiskutuspumpeille menevää polttoainetta, jonka lämpötila saa olla korkeintaan 45 °C.

Polttoaineen lämpeneminen riippuu kuormasta, joilla pääkoneita ajetaan ja mixing-tankkiin palaavan paluuvirtauksen suuruudesta. Kuva 10 esittää polttoainepumppujen lämmitystehoa tietyllä kuormalla ajettaessa.



Kuva 10 Wärtsilä 46 Polttoaineen lämpeneminen ruiskutuspumpeissa. Wärtsilä 2009

Polttoaineen lämpeneminen polttoainepumpeissa saadaan laskettua alla olevalla kaavalla

Kaava 1 polttoaineen lämpeneminen

$$\Delta T = \frac{P_{FP}}{\dot{m}_{pa} \cdot C_{pa}}$$

ΔT = Polttoaineen lämpeneminen polttoainepumpeissa.

\dot{m}_{pa} = Polttoaineen massavirta (Boosterpumpun tuotto)

C_{pa} = Polttoaineen ominaislämpökapasiteetti

P_{FP} = Polttoainepumppujen lämmitysteho

Lasku esimerkissäni on tavanomainen tilanne, jossa ajetaan kahdella pääkoneella ja noin 85% kuormalla.

$$\Delta T = \frac{3,3kW /cyl * 18cyl * 3600s/h}{5300l/h * 0,9kg/l * 2,08kJ/kg^{\circ}C}$$

$$\Delta T = 22^{\circ}C$$

Alla olevassa taulukossa on laskettu kaavalla 1 polttoaineen lämpeneminen eri kuormilla ajettaessa.

Taulukko 3 Lämpötilanmuutos

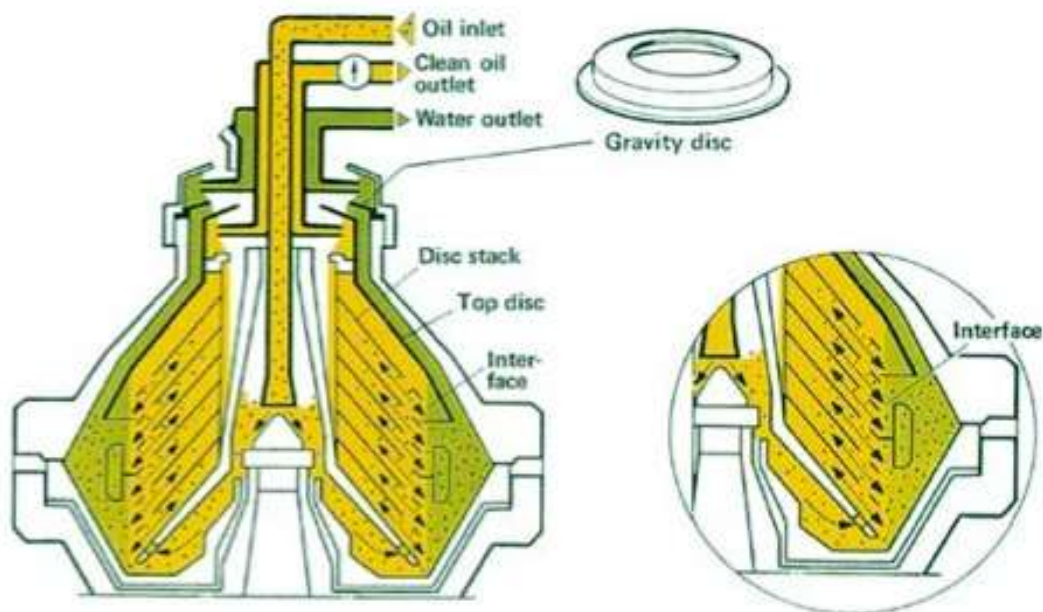
Kuorma (%)	Lämpöteho (kW/cyl)	lämpötilanmuutos (C)
0	0,50	3,27
5	0,68	4,41
10	0,85	5,55
15	1,03	6,69
20	1,20	7,84
25	1,38	8,98
30	1,55	10,12
35	1,73	11,27
40	1,90	12,41
45	2,08	13,55
50	2,25	14,70
55	2,43	15,84
60	2,60	16,98
65	2,78	18,12
70	2,95	19,27
75	3,13	20,41
80	3,30	21,55
85	3,48	22,70
90	3,65	23,84
95	3,83	24,98
100	4,00	26,12

4.2 Separaattorin ominaispainolevyn vaihto

Polttoaine sisältää vettä ja muita epäpuhtauksia. Lisäksi polttoaineen vesipitoisuus kasvaa varastotankkien lämpötilavaihteluista johtuvan kondenssiveden vuoksi. Separaattori on laite, jolla polttoaineesta poistetaan vesi käyttämällä avuksi keskipakoisvoimaa. Puhdistamaton öljy syötetään separaattorin kulhon pohjalle. Separaattorin

pyöriessä ominaispainoltaan kevyempi polttoaine nousee levypakan lävitse ylös ja ominaispainoltaan raskaampi vesi siirtyy likaisesta polttoaineesta levypakan reunoille. Purifikaattori-tyyppisissä separaattoreissa polttoaine ja vesi virtaavat jatkuvasti ulos kuulasta. Polttoaine jatkaa matkaansa päivätankkiin, vesi ja likapartikkelit siirtyvät sludgetankkiin. (Vermeire 2012 s. 21)

Purifikaattori-tyyppisissä separaattoreissa ominaispainolevyllä säädetään veden ja öljyn rajapinta oikeaan kohtaan, että separointi tapahtuisi parhaalla mahdollisella teholla. Veden ja polttoaineen rajapinnan kuuluu sijaita levypakan ulkopuolella, mutta pakan kannen (Top disk) sisäpuolella. Rajapintaa saadaan säädettyä ominaispainolevyllä. Ominaispainolevyn koko määräytyy separoitavan polttoaineen tiheyden mukaan. Kevyen polttoaineen tullessa käyttöön on separaattorin ominaispainolevy vaihdettava, koska uuden ja vanhan polttoaineen tiheydet eroavat toisistaan.

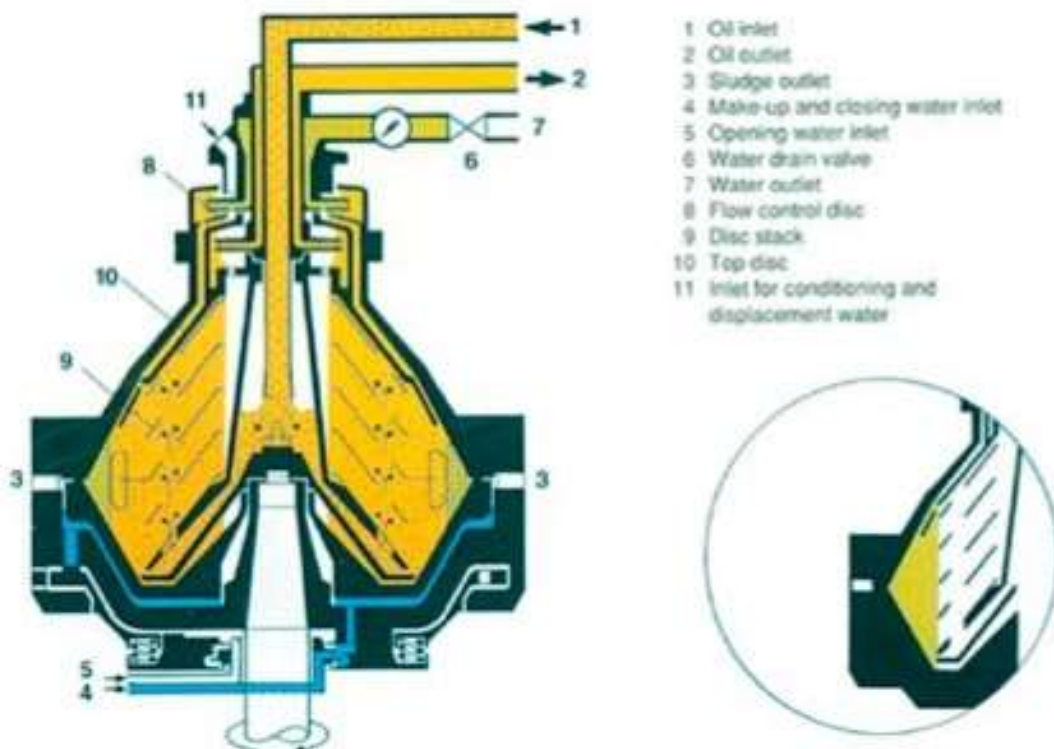


Kuva 11 Purifikaattori. Vermeire 2012

4.2.1 ALCAP separaattori

Serenaden polttoaine separaattorit ovat alcap-separaattoreita. Alcap separaattori toimii klarifikkaattorina. Alcap separaattorissa vesi ja kiinteä lika kiihdytetään kulhon reunalle ja puhdas polttoaine virtaa jatkuvasti ulos separaattorista. Separattorin tyhjennys tapahtuu ajastetusti. Mikäli kulhon reunoille kertyy vettä nopeammin kuin

ajastettu tyhjennys ehtii poistaa, vesi pääsee levypakan läpi puhtaan polttoaineen kanavasta ulos separaattorista. Alcap-separaattoreissa on anturi, joka tarkkailee puhtaan polttoaineen vesipitoisuutta, joten vesipitoisuuden noustessa separaattorin kuula avautuu tyhjentäen veden pois. (Vermeire 2012 s.23)



Kuva 12 Alcap Separattori. Vermeire 2012

Kevyttä polttoainetta käyttönottaessa Serenaden polttoaineseparaattorit eivät vaadi muita toimenpiteitä kuin polttoaineen lämpötilarajojen muutokset. Raskaan polttoaineen separointilämpötila on noin 90 °C ja dieselille sopiva lämpötila on 35 °C. Koska Serenaden polttoaineseparaattoreita on käytetty raskaan polttoaineen separointiin, on ne avattava ja puhdistettava ennen kevyen polttoaineen käyttöönottoa.

4.3 Polttoainepumppujen huono voitelu

Raskas polttoaine voitelee polttoainepumppuja huomattavasti paremmin kuin diesel. Vaarana onkin, että polttoainepumput jumittuvat voitelun puutteen vuoksi.

4.4 Polttoainesuodattimien tukkeutuminen

Aluksella on käytetty polttoaineena raskasöljyä vuosikausia. Raskasöljy sisältää tuhkaa, hiekkaa ja monenlaisia muita epäpuhtauksia. Uusi polttoaine on hyvin samanaista kuin diesel. Dieselille on ominaista, että se liottaa epäpuhtauksia vanhasta putkistosta. Kun lika putkistossa alkaa liikkua se pysähtyy polttoaineen suodattimiin tukkien ne.

4.5 Bunkrauksen vaikeutuminen

Tällä hetkellä polttoainetta bunkrataan Tukholmassa proomusta. Uudelle polttoaineelle ei ole löytynyt toimittajaa, joka pystyisi toimittamaan polttoaineen proomulla. Siksi bunkraus suoritetaan säiliöautoista. Proomu pystyy toimittamaan polttoainetta satoja tonneja kerralla ja niiden pumpuissa on suuri tuotto. Suuriin säiliöautoihin mahtuu noin 30 kuutiota ja niiden pumppujen tuotto on huomattavasti proomuja tehottomampi. Serenaden polttoaineen kulutus on noin 50 kuutiota vuorokaudessa. Tästä syystä säiliöautoja tarvitaan jatkuvasti. Polttoaineen bunkraus lisäksi työllistää aina yhden mestarin ja moottorimiehen.

5 KEVYEN POLTTOAINEEN HYÖDYT

Kevyen polttoaineen käyttöönotossa saavutetaan myös joitakin hyötyjä. Raskas polttoaine vaatii lämmitystä varasto-, päivä- ja settling tankkeihin, polttoaine separaattoreiden ja viskometrien etulämmittimiin ja polttoaineputkien saattolämmityksiin. Lämmitykset on toteutettu höyryllä. MDO ei vaadi lämmitystä, joten saavutetaan merkittäviä säästöjä kattiloiden polttoaineen kulutuksessa. Osa pääkoneiden huoltoväleistä pitenee. Konehuoneen tietyissä osissa ei ole enää niin kuuma kuin ennen ja konehuone pysyy paljon siistimpänä.

5.1 Huoltovälien muutokset

Koska MDO polttoaineet eivät sisällä epäpuhtauksia niin paljon kuin raskaat polttoaineet, osa pääkoneiden huoltoväleistä pitenee.

Taulukko 4 Wärtsilä 46, Huoltovälit

Wärtsilä 46 Huoltovälit		
Koneen osa	HFO (h)	MDO (h)
Imuventtiilit	24000	36000
Pakuventtiilit	24000	36000
Sylinterin kannet	60000	72000
Männän renkaat	12000	18000
Männän toppi	36000	54000
Sylinteriputki	72000	90000

6 MUUTOSTYÖT

6.1 Polttoainetankkien puhdistus

MDO:n käyttöön siirryttäessä tarvitaan lisää tilaa dieselin varastointiin. Dieselin varastointia varten on puhdistettava vanhoja raskasöljyn varastointiin käytettyjä tankkeja. Suuria varastotankkeja ei saada koskaan polttoaineen siirtopumpuilla täysin tyhjiksi vaan niiden pohjalle jää vanhoja polttoaineen jäämiä. Varastotankit joudutaan imemään imuautojen letkuilla tyhjiksi. Vanhojen raskasöljytankkien seiniin ja pohjaan on juuttunut kiinteää likaa, joka täytyy puhdistaa ennen dieselin bunkrausta. Seinissä ja pohjassa kiinni oleva lika liukenee muuten dieselin joukkoon ja tukkii suodattimia.

6.2 Polttoaineen jäähdytin

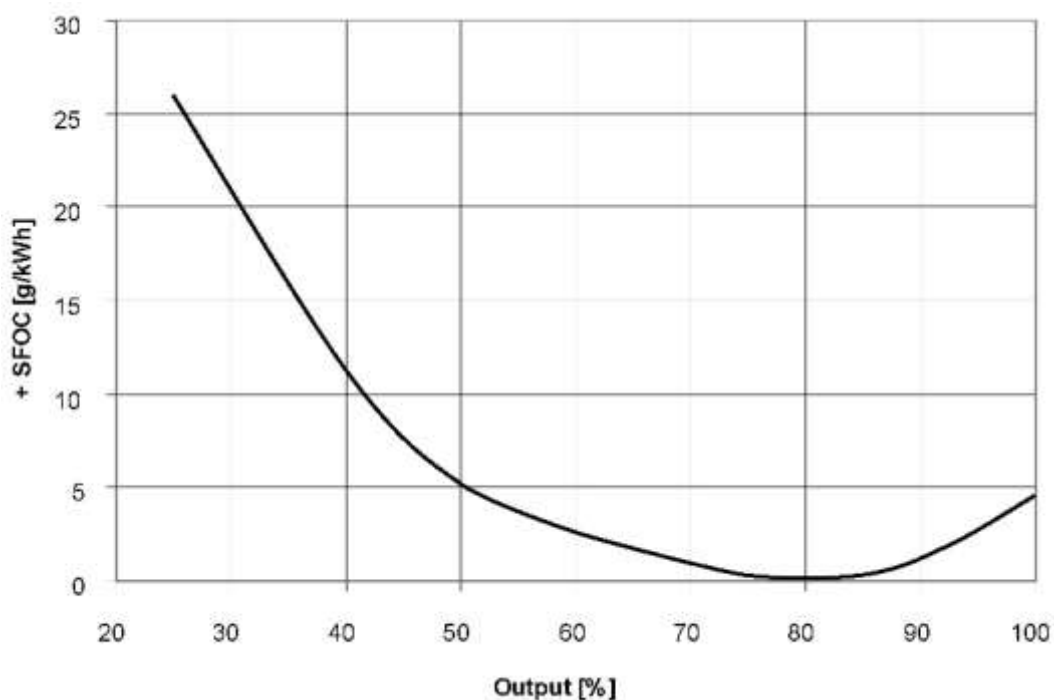
Polttoaineen jäähdyttimet asennetaan polttoainekierron paluupuolelle pääkoneiden ja mixingtankin väliin. Tällä tavoin saadaan jäähdytettyä polttoainepumpuissa polttoaineeseen siirtynyt lämpöenergia, joka on lämpiämisen kannalta suurin ongelma. Polt-

toaineen jäähdytykseen käytetään LT-vettä. LT-vesi polttoainejäähdyttimelle otetaan LT-veden jäähdyttimeltä tulevasta linjasta ja paluupuoli liitetään jäähdyttimen sisään menevään linjaan. Jäähdytin on malliltaan vastavirta levylämmönvaihdin.

6.2.1 jäähdyttimen mitoitus

Jäähdytintä mitoittaessa on määritettävä paluulinjan polttoaineen suurin mahdollinen lämpömäärä. Polttoaineen lämpömäärä koostuu paluuvirtauksen massavirran, Polttoaineen ominaislämpökapasiteetin, ja halutun lämpötilamuutoksen tulosta. Ennen polttoaineen paluuvirtauksen laskemista on määriteltävä polttoaineen kulutus eri tehoalueilla.

Alla olevasta kuvaajasta nähdään polttoaineen kulutus eri tehoalueilla. Moottorin paras hyötysuhdealue on käyttäessä 75-85% tehoa. Polttoaineen kulutusta kuvataan SFOC-arvolla, joka kuvaa kuinka monta grammaa polttoainetta tarvitaan yhtä kilowattituntia kohden. Wärtsilä 46 SFOC arvo on 170 g/kWh.



Kuva 13 Wärtsilä 46 SfoC –käyrä. Wärtsilä 2009

Polttoaineen lämpömäärä saadaan laskettua alla olevalla kaavalla.

$$Q = \Delta t * m_{pa} * c_{pa}$$

Kaava 2 Polttoaineen lämpöteho Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008 s14

Q = Lämpöteho

Δt = Lämpötilan haluttu muutos

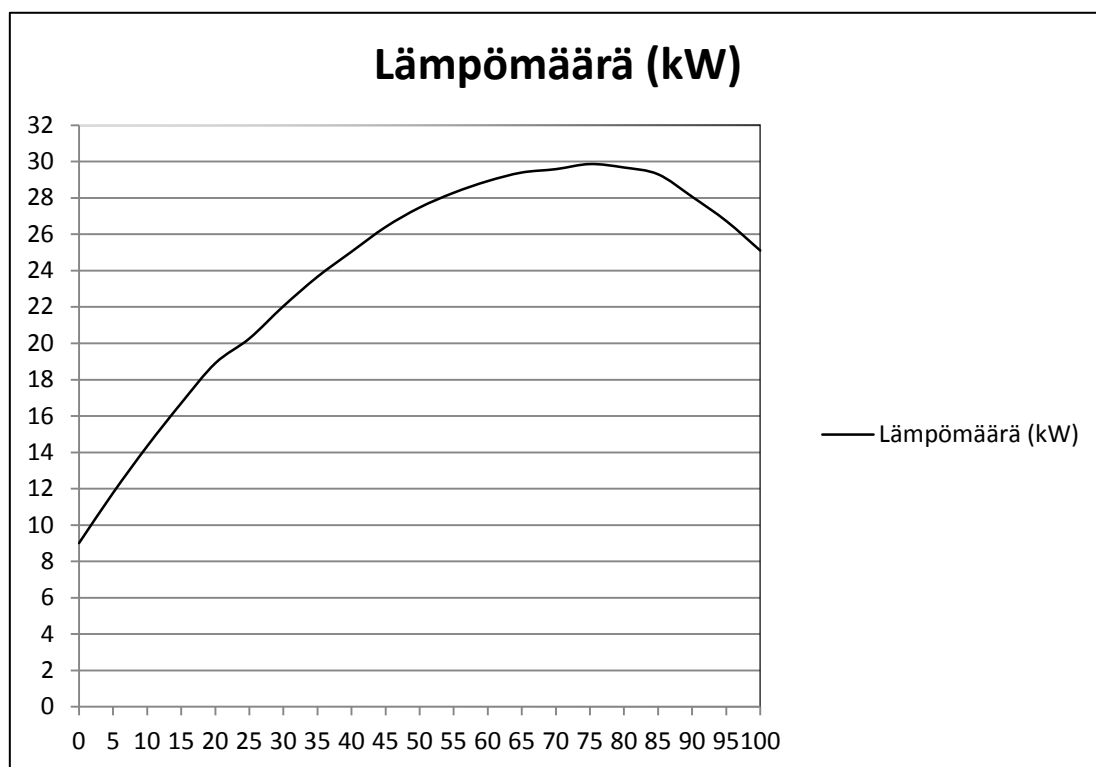
m_{pa} = Polttoaineen massavirta

Taulukossa x on laskettu polttoaineen kulutus, paluuvirtaus ja Lämpömäärä eri kuormilla. Polttoaineen kulutukset on laskettu tilanteessa jolloin molemmat boosteryksikön koneet ovat käytössä.

Taulukko 5 Polttoaineen Lämpömäärä

Kuorma	Polttoaineen kulutus (kg/s)	polttoaineen paluuvirtaus (kg/s)	lämpötilan muutos	Lämpömäärä (kW)
0	0,000	1,325	3,270	9,012
5	0,041	1,284	4,410	11,774
10	0,083	1,242	5,550	14,339
15	0,124	1,201	6,690	16,708
20	0,166	1,159	7,840	18,904
25	0,240	1,085	8,980	20,264
30	0,278	1,047	10,120	22,042
35	0,316	1,009	11,270	23,661
40	0,355	0,970	12,410	25,041
45	0,388	0,937	13,550	26,400
50	0,427	0,898	14,700	27,471
55	0,467	0,858	15,840	28,284
60	0,506	0,819	16,980	28,925
65	0,545	0,780	18,120	29,397
70	0,587	0,738	19,270	29,582
75	0,622	0,703	20,410	29,863
80	0,663	0,662	21,550	29,673
85	0,704	0,621	22,700	29,300
90	0,759	0,566	23,840	28,064
95	0,810	0,515	24,980	26,734
100	0,863	0,462	26,120	25,107

Laskelmista selvisi että, paluulinjan polttoaineen suurin lämpömäärä on 70 – 85 prosentin kuormilla ajettaessa. Kuorman noustessa 70 prosenttiin lämpömäärä nousee tasaisesti. Kuorman ylittäessä 85 prosenttia lämpömäärä alkaa laskea. Lämpömäärän laskee koska polttoaineen kulutuksen kasvaessa paluuvirtaus pienenee. Jäähdytin on mitoitettava noin 30 kW mukaisesti.



Kuva 14 Polttoaineen Lämpökäyrä. Rinta-aho 2014

Jäähdytysveden kierrätyspumpun tuotoksi on valittu 2 kg/s ja veden lämpötilaksi ennen jäähdytintä 35 °C. Näillä tiedoilla voidaan laskea Jäähdytysveden lämpeneminen jäähdyttimessä sekä logaritminen lämpötilaero.

Jäähdytysveden lämpeneminen jäähdyttimessä.

$$\Delta t = \frac{Q}{\dot{m}_j \cdot c_j}$$

Kaava 3 Jäähdytysveden lämpöero Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008 s.14

Q = jäädyttimen teho

\dot{m}_{jv} = jäädytysveden massavirta

c_{jv} = jäädytysveden ominaislämpökapasiteetti

$$\Delta t = \frac{30 \text{ kW}}{2 \text{ kg/s} * 4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}} = 3,6^\circ\text{C}$$

Logaritminen lämpötilaero lasketaan kaavalla 4

$$\theta_{\ln} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\ln\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right)}$$

Kaava 4 Logaritminen lämpöero Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008 s.28

Kaavassa 4 θ_1 on tulevan polttoaineen ja lähtevän jäädytysveden lämpötilojen erotus ja θ_2 on jäädyttimeltä lähtevän polttoaineen ja tulevan jäädytysveden lämpötilojen erotus.

$$\theta_{\ln} = \frac{24,1 - 5}{\ln\left(\frac{24,1}{5}\right)} = 12,144$$

Lämmönsiirtimen konduktanssi G lasketaan jakamalla lämmönsiirtimen teho logaritmisella lämpötilaerolla.

$$G = \frac{Q}{\theta_{\ln}}$$

Kaava 5 Konduktanssi Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008 s.30

$$G = \frac{30 \text{ kW}}{12,144^\circ\text{C}} = 2,47 \text{ kW/}^\circ\text{C}$$

Konduktanssin laskemisen jälkeen lasketaan jäähdyttimen lämmönsiirtopinta-ala. Levylämmönsiirtimen lämmönsiirtokyky on $6000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ joten, lämmönvaihtimen lämmönsiirtopinta-ala on lämmönsiirtokyky jaettuna konduktanssilla.

$$A = \frac{6000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{2470 \text{ W/}^\circ\text{C}} = 2,429 \text{ m}^2$$

Kaava 6 Lämmönsiirtimen pinta-ala Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008 s.30

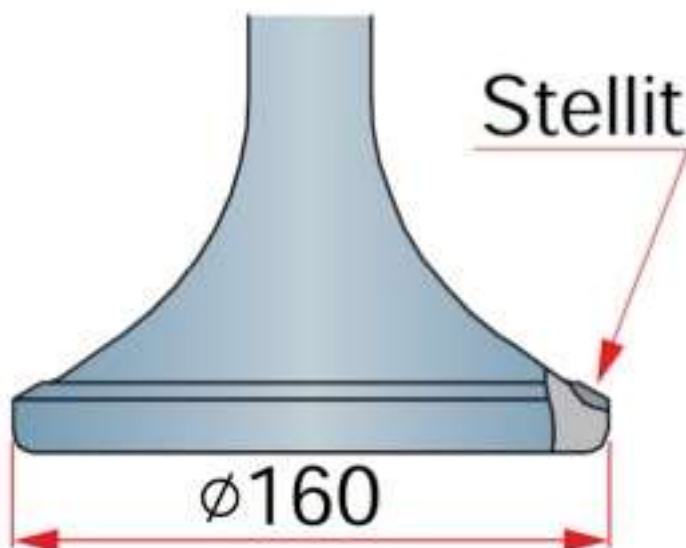
6.2.2 jäähdyttimen asennus

Polttoaineen jäähdyttimet asennetaan separaattorihuoneeseen boosteryksiköiden lähelle. LT-veden jäähdyttimet sijaitsevat pääkonehuoneessa. Separaattorihuone ja pääkonehuone ovat erillisiä vesitiiviitä osastoja, joten jäähdytysvesiputket joudutaan tuomaan vesitiiviin laipion läpi.

Jäähdytysvesipumpuille sopiva on tuotto on noin 2 kg/s eli noin 7200 l/h . Jäähdytysveden korkealla massavirralla saadaan vähennettyä veden lämpötilannousua. Jäähdyttimelle tulevan virtauksen säätö on helpointa toteuttaa asentamalla polttoainelinjaan ennen jäähdytintä sähköinen kolmitieventtiili. Jäähdyttimen jälkeiseen polttoainelinjaan asennetaan lämpötila-anturi, joka tarkkailee polttoaineen lämpötilaa jäähdyttimen jälkeen. Kun lämpötila ylittää asetetun arvon kolmitieventtiili ohjaa polttoaineen virtausta lisää jäähdyttimelle. Kun polttoaineen lämpötila on liian matala, ohjaa kolmitieventtiili virtausta ohituslinjaan, joka menee suoraan mixingtankkiin.

6.3 Pakoventtiilien vaihto

Pääkoneen pakoventtiilit on valmistettu Nimonic metalliseoksesta. Raskas polttoaine sisältää voitelun kannalta tärkeitä ainesosia, jotka suojaavat seetipintoja. Dieselöljy ei sisällä samanlaisia voiteluominaisuuksia kuin raskasöljy, joten seetipinnat kuluvat nopeammin. Nimonic venttiilit kannattaakin vaihtaa Stelliitillä pinnoitettuihin.



Kuva 15 Pakoventtiili. Wärtsilä 2009.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyöni tavoitteena oli löytää sopiva ratkaisu, jolla Silja Serenaden rikkioksidipäästöt saataisiin uusien voimaan tulevien rajoitusten mukaiseksi. Työtä aloittaessa huomasin, että ratkaisuvaihtoehtojen esittelystä olisi tullut liian laaja kokonaisuus, joten rikkipesureiden ja maakaasun käytöstä en voinut kertoa muuta kuin välttämättömimmät laitteistojen toimintaan perustuvat asiat. En kokenut tarpeellisena syventyä rikkipesureihin ja maakaasuun enempää, koska tuli nopeasti selväksi, että ne eivät Serenaden tapauksessa ole hyviä vaihtoehtoja.

Kevyen polttoaineen käyttöönottoon liittyvistä ongelmista oli vaikea löytää tarkkoja tietoja. Löysin ainoastaan yhden konevalmistajan ohjekokoelman, jossa aiheesta kerrottiin.

Muutostöiden suunnittelussa ongelmia aiheutti polttoaine jäähdyttimen mitoitus, jota varten syvennyin lämmönsiirto-opin laskukaavoihin. Polttoaineen lämpiämisestä ei ole olemassa täysin varmaa tietoa Silja Serenadella. Kaikki laskut on tehty Wärtsilän ilmoittamien arvojen ja tulosten mukaisesti. Laskelmissa voi olla joitain epätarkkuuksia koska Wärtsilän antamat arvot on mitattu testilaboratoriossa eikä varsinaisessa konehuoneessa. Lämpötila konehuoneessa tulee laskemaan kevyen polttoaineen käyttöönotossa mutta ei tiedetä vielä kuinka paljon. Tästä syystä ei ole olemassa varmaa tietoa siitä kuinka paljon konehuoneen lämpötila vaikuttaa polttoaineen lämpiämiseen.

Koska opinnäytetyöni on valmistunut ennen varsinaisten muutostöiden aloittamista, käsittelen muutostöitä ainoastaan teoreettisesti. Työstäni jäi myös pois kevyen polttoaineen käyttöönoton jälkeiset käyttökokemukset ja taloudelliset näkökulmat.

LÄHTEET

Merenkulun ympäristösuojelulaki. 2009. Viitattu 12.10.2014

<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2009/20091672>

Shipowners. merenkulun ilmansuojelu. 2009. Viitattu 9.10.2014

<http://www.shipowners.fi/fi/ymparisto/ilmansuojelu%20ja%20ilmastonmuutos/merenkulun%20rikkipaastot>

IMO. Historia ja marpol annex VI 2014. Viitattu 20.10.2014 <http://www.imo.org/>

IMO Marpol 2014. Viitattu 24.10.2014

[http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

Rikkipesurit. 2012. Viitattu 7.9.2014

http://www.bureauveritas.com/wps/wcm/connect/fe2970d-288d-413b-8555-e5fb70ca13b0/ExhaustScrubbers_LD.pdf?MOD=AJPERES

Shippipedia. 2013. Viitattu 9.9.2014 <http://www.shippipedia.com/scrubber/>

Wärtsilä Sg- moottori 2014. Viitattu 23.11.2014 <http://www.wartsila.fi/en/power-plants/technology/combustion-engines/gas-engines>

Wärtsilä. Dual fuel, diesel-gas moottorit 2014. Viitattu 22.11.2014

<http://www.wartsila.fi/en/power-plants/technology/combustion-engines/multi-fuel-engines>

Wärtsilä. low sulphur guidelines. 2009. viitattu 2.8. 2014

<http://www.intertanko.com/upload/24779/LowSulphurGuidelines.pdf>

Vermeire, M. 2012. Everything you need to know about marine fuels. Belgium. Chevron Global Marine Products.

Markku J. Lampinen, Mamdouh El Haj Assad ja Voitto Kotiaho 2008. Lämmönsiirto-oppi. Helsingin Teknillinen korkeakoulu