



Timo Astikainen

Laivan pääkoneiston pakokaasun- puhdistuslaitteistojen laskentatyö- kalun kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

9.2.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Timo Astikainen
Otsikko:	Laivan pääkoneiston pakokaasunpuhdistuslaitteistojen laskentatyökalun kehittäminen
Sivumäärä:	32 sivua
Aika:	9.2.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine:	Energiatekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Tomi Hämäläinen Senior Designer Juha Paavola

Tämä insinöörityö toteutettiin Helsinki Shipyard Oy:lle. Työn tavoitteena oli tehdä katsaus tämänhetkisiin pakokaasunpuhdistusmenetelmiin ja niihin liittyviin säädöksiin sekä kehittää telakan koneistoratkaisujen konseptivaiheen laskentatyökalua. Laskentatyökalun kehitys pitää sisällään pääkoneiston pakokaasujen elementtien laskennan pohjautuen käytetyn polttoaineen valintaan sekä pakokaasunpuhdistuslaitteistojen avulla saavutettavat vähennykset kyseisiin elementteihin. Tarkastelussa ovat SCR-katalysaattori ja skrubberi sekä laitteiston käyttämän lisäaineen kulutus tai tarvittava pumppausteho.

Pakokaasunpuhdistus on ajankohtainen aihe erityisesti meriliikenteessä. Kansainvälisen laivaliikenteen määrä ja sen aiheuttamat päästöt ovat valtavia, joten paine kiristää päästörajoituksia on kova ja tulevaisuudessa rajoitukset tulevat kiristymään mahdollisesti kiihtyvällä tahdilla. On siis tärkeää kehittää jatkuvasti uusia ratkaisuja päästöjen kontrolloimiseksi ja myös tuoda niitä laivaliikenteen käyttöön.

Työssä saatiin koottua yhteen tällä hetkellä yleisimmin käytössä olevista pakokaasunpuhdistusmenetelmistä (SCR ja skrubberi) tietopaketti, jota voidaan hyödyntää muun muassa laitteistoratkaisujen suunnittelussa sekä käytössä. Myös hiukkassuodattimia käsiteltiin, mutta niitä on toistaiseksi huonosti saatavilla laivakäyttöön tarkoitettuihin keskinopeisiin dieselmoottoreihin.

Helsinki Shipyardin käytössä olevaan laskentatyökaluun kehitettyjä osioita hyödynnetään jatkossa laivan konseptivaiheen suunnittelussa. Niillä saadaan tuotettua lisätietoa vaihtoehtoisiin koneistoratkaisuihin ja vaihtoehtoja voidaan näin arvioida paremmin kokonaisuuden kannalta. Laskentatyökaluun liittyy myös jatkokehitysmahdollisuuksia muun muassa pienhiukkasmäärien ja -puhdistusmenetelmien laskennan sekä dual fuel -moottoreiden metaanipäästöjen osalta.

Avainsanat: laiva, pakokaasunpuhdistus

Abstract

Author: Timo Astikainen
Title: Development of a Calculation Tool for Ships' Exhaust Gas After-Treatment Equipment
Number of Pages: 32 pages
Date: 9 February 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and environmental technology
Professional Major: Energy technology
Supervisors: Tomi Hämäläinen, Principal Lecturer
Juha Paavola, Senior Designer

This thesis was made for Helsinki Shipyard. The purpose of this thesis was to provide an overview of the current exhaust gas after-treatment technologies and the associated emission regulation and to improve the shipyard's machinery calculation tool so that it would be able to calculate produced emissions and possible reductions. The calculation would include three exhaust gas components (CO₂, NO_x and SO_x) based on the selected fuel oil. The reductions to the exhaust gas components were calculated when either selective catalytic reduction or scrubber or both were in use. Additionally, the consumption of the needed additive or the required pumping power for the after-treatment system was also calculated.

Exhaust-gas after treatment is currently a major topic especially in sea traffic. The amount of international shipping is tremendous and so are the produced emissions. Emission control is getting increasingly strict; therefore, it is important to develop new solutions to meet the new emission standards.

An information package of the currently most used after-treatment systems, SCR and scrubber, was gathered. PM-filters were also covered but currently there are not so many applications for medium speed marine diesel engines. The development of the shipyards machinery calculation tool is utilized in the concept phase of the ship design. Calculation tool can now be used to calculate produced emissions and consumption of needed additives or required pumping power. In the future calculation tool can be further developed so that it can calculate produced particulate matter and methane emissions in dual fuel engines.

Keywords: ship, exhaust gas after-treatment

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Polttomootorin pakokaasupäästöt	2
2.1	Hiilidioksidi (CO ₂) ja hiilimonoksidi eli häkä (CO)	3
2.2	Typen oksidit (NO _x)	3
2.3	Rikin oksidit (SO _x)	4
2.4	Pienhiukkaset (PM)	4
3	Laivojen päästövaatimukset	5
3.1	Typen oksidit (NO _x)	5
3.2	Rikin oksidit (SO _x)	7
3.3	Pienhiukkaset (PM)	8
4	Laivassa käytettävät polttoaineet	9
4.1	Jäännöspolttoaineet (Residual marine fuels)	9
4.2	Tislatut polttoaineet (Distillate marine fuels)	10
4.3	Nesteytetty maakaasu (LNG)	10
5	Pakokaasunpuhdistusmenetelmät	11
5.1	Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (SCR)	11
5.2	Pakokaasupesuri (Scrubber)	14
5.2.1	Avoimen kierron märkäpesuri (Open loop scrubber)	15
5.2.2	Suljetun kierron märkäpesuri (Closed loop scrubber)	17
5.2.3	Hybridi pakokaasupesuri (Hybrid scrubber)	19
5.3	Dieselhiukkassuodatin (DPF)	20
6	Laskentatyökalun kehittäminen	23
7	Yhteenveto	32

Lähteet

Lyhenteet

ECA: *Emission Control Area*. Alue, jolla on voimassa erillisiä päästörajotuksia. Käytetään myös NECA- ja SECA-nimityksiä typpi- tai rikkipäästöjen rajoitusalueista.

IMO: *International Maritime Organization*. Kansainvälinen merenkulkujärjestö.

LNG: *Liquefied Natural Gas*. Alle -160 °C:n lämpötilaan jäähdytetty nestemäisessä olomuodossa oleva maakaasu.

MARPOL: *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*. IMO:n alainen kansainvälinen kokous, jonka tarkoitus on ehkäistä laivojen aiheuttamia ympäristöhaittoja.

MDO: *Marine Diesel Oil*. Yli 0,1 % rikkiä sisältävä raskaan polttoöljyn ja polttoainetisleen seos.

MGO: *Marine Gas Oil*. 0,1 % tai vähemmän rikkiä sisältävä korkealatuinen laivapolttoaine.

PM: *Particulate Matter*. Kiinteät ja nestemäiset pienhiukkaset ilmassa.

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee laivan pääkoneiston pakokaasunpuhdistusjärjestelmiä. Työ on tehty Helsinki Shipyard Oy:lle. Helsinki Shipyard on Helsingin Hietalahdessa sijaitseva vaativaan meriteknologiaan ja laivanrakennukseen erikoistunut telakkayhtiö. Telakan juuret juontavat vuoteen 1865, jolloin samalle paikalle on perustettu ensimmäinen telakkayhtiö. Yhtiö työllistää noin 400 työntekijää erilaisissa projektinjohtamis-, suunnittelu- ja rakennustehtävissä.

Opinnäytetyön tavoitteen on tehdä katsaus tämänhetkisiin pakokaasunpuhdistusmenetelmiin ja niihin liittyviin säädöksiin sekä kehittää telakan koneistoratkaisujen konseptivaiheen laskentatyökalua. Laskentatyökalun kehitys pitää sisällään pääkoneiston pakokaasujen elementtien (CO_2 , NO_x , SO_x) laskennan pohjautuen käytetyn polttoaineen (HFO, MDO/MGO, LNG) valintaan sekä pakokaasunpuhdistuslaitteistojen avulla saavutettavat vähennykset kyseisiin elementteihin. Tarkastelussa ovat SCR-katalysaattori (NO_x) ja skrubberi (SO_x) sekä laitteiston käyttämän lisäaineen kulutus tai tarvittava pumppausteho.

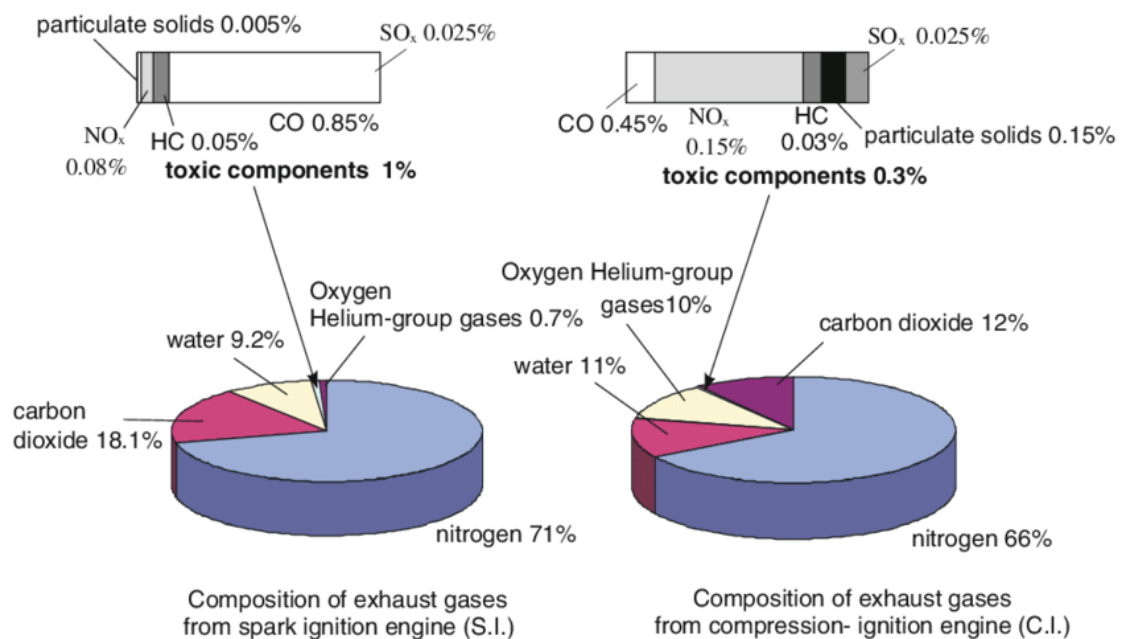
Pakokaasunpuhdistus on ajankohtainen aihe erityisesti meriliikenteessä. Kansainvälisen laivaliikenteen määrä ja sen aiheuttamat päästöt ovat valtavia, joten paine kiristää päästörajoituksia on kova ja tulevaisuudessa rajoitukset tulevat kiristymään mahdollisesti kiihtyvällä tahdilla. On siis tärkeää kehittää jatkuvasti uusia ratkaisuja päästöjen kontrolloimiseksi ja myös tuoda niitä laivaliikenteen käyttöön.

Opinnäytetyössä käydään läpi polttomoottorin tuottamat pakokaasupäästöt, meriliikenteen päästörajat, laivoissa käytettävät polttoaineet sekä pakokaasujen puhdistusmenetelmät. Tämän jälkeen esitellään telakan laskentatyökaluun kehitetyt osiot.

2 Polttomoottorin pakokaasupäästöt

Polttomoottorin pakokaasupäästöt syntyvät polttoaineen palamisen tuloksena. Ihanteellisessa tapauksessa palamistuotteena olisi vain hiilidioksidia ja vesihöyryä, mutta todellisuudessa moottorit tuottavat myös palamattomia polttoaineosia ja palamisen sivutuotteita, jotka ovat terveydelle haitallisia ainakin jossakin määrin. [1.]

Moottoreiden pakokaasupäästöjen koostumus on erilainen kipinäsytytteisissä ja puristusytytteisissä moottoreissa. Suurimmat erot ovat kipinäsytytteisten moottorien suuri hiilimonoksidin osuus sekä puristusytytteisten moottorien pienhiukaspäästöt. Myös typen oksidien määrä on jonkin verran suurempi puristusytytteisissä moottoreissa. Kuvassa 1 on esitetty edellä mainittujen moottorityyppien pakokaasupäästöjen koostumukset. [2.]



Kuva 1. Kipinä- ja puristusytytteisten moottorien pakokaasupäästöjen koostumukset [2, s 99].

2.1 Hiilidioksidi (CO₂) ja hiilimonoksidi eli häkä (CO)

Hiilivetyjä sisältävän polttoaineen täydellisen palamisprosessin tuloksena syntyy hiilidioksidia ja vettä. Jos hiilivetyjen yhteydessä ei ole happea riittävästi, niin palamisprosessi jää epätäydelliseksi ja syntyy hiilimonoksidia. [1.] Tällä hetkellä ei ole olemassa riittävän energiatehokasta keinoa hiilidioksidin poistamiseksi moottorikäyttöjen pakokaasuista. Hiilidioksidin määrä on suorassa suhteessa käytetyn polttoaineen sisältämään hiileen. [3.] Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu. Se sitoo maapallolta säteilevää lämpöä itseensä ja sitten vapauttaa sitä pitkän ajan kuluessa lämmittäen näin ilmakehää. Hiilidioksidi liukenee myös meriin aiheuttaen merien happamoitumista. Häkä (CO, hiilimonoksidi) puolestaan on terveydelle vaarallinen, hajuton ja väritön kaasu. Se sitoutuu hemoglobiiniin happea paremmin ja tarpeeksi suurena pitoisuutena saa aikaan hapenpuutteen ja kuoleman. [4.]

2.2 Typen oksidit (NO_x)

Ilma koostuu pääosin hapestä ja timestä. Typen oksidien muodostumismekanismi ovat terminen-, polttoaine- ja nopea-NO_x. Terminen-NO_x edellyttää yli 1300 °C:n lämpötilaa sekä riittävän pitkää viipymäaika korkeassa lämpötilassa. Mitä korkeampi palamislämpötila on, sitä enemmän typen oksideja muodostuu. Polttoaine-NO_x puolestaan riippuu polttoaineen tyypipitoisuudesta sekä palamisvyöhykellä olevan vapaan hapen määrästä. Nopea-NO_x muodostuu, kun palamisilman tyyppi reagoi palotilaan muodostuvien hiilivetyradikaalien kanssa. Moottorin tuottamia typpipäästöjä voidaan kontrolloida vaikuttamalla polttoaineen ja ilman seossuhteeseen sekä palamislämpötilaan. Dieselmoottorit tuottavat enemmän typen oksideja verrattuna bensamoottoreihin korkeamman palolämpötilansa vuoksi. [5.] Typen oksidit ovat ilmansaasteita, jotka ovat terveydelle ja ympäristölle haitallisia. Reagoidessaan muiden aineiden kanssa ne muodostavat esimerkiksi savusumua, otsonia tai happamia sateita. [4.]

2.3 Rikin oksidit (SO_x)

Polttomoottorin rikkipäästöt ovat peräisin polttoaineen sisältämästä rikistä. Rikki reagoi moottorissa palamisprosessin aikana hapen kanssa ja muodostuu rikin oksideja (SO_x). Mitä enemmän polttoaineessa on rikkiä, sitä enemmän rikkipäästöjä muodostuu. Polttoaineen rikkipitoisuutta on mahdollisuus vähentää, mikä luonnollisesti lisää polttoaineen hintaa. Laivassa käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuudet vaihtelevat yleensä raskaan polttoöljyn enintään 3,5 %sta vähärikkisen kaasuöljyn alle 0,1 %:iin. [6, s. 10–11.] Rikin oksidit ovat haitallisia ihmisten terveydelle aiheuttaen muun muassa hengityselimistön oireita. Ilmastoone vaikuttavat aiheuttamalla happamia sateita, jotka vahingoittavat metsiä ja maataloutta sekä happamoittavat vesistöjä. [4.]

2.4 Pienhiukkaset (PM)

Dieselmoottorin ja suoraruiskutteisen bensiinimoottorin pakokaasut sisältävät myös kiinteitä ainesosia kaasumaisten lisäksi. Hiukkasia syntyy, kun polttoainepisara palaa sylinterissä epätäydellisesti paikoissa, joihin palorintama ei pääse, kuten männänrenkas. Myös polttoaineen pisarakoolla sekä viipymällä sylinterissä on merkitystä. [1.] Pienhiukkasten koko vaikuttaa niiden aiheuttamiin terveys- ja ympäristöhaittoihin. Alle 10 µm:n kokoiset hiukkaset (PM₁₀) voivat aiheuttaa keuhko ja sydänongelmia. PM_{2,5} eli alle 2,5 µm:n kokoiset hiukkaset puolestaan vaikuttavat näkyvyyteen ja ympäristön happamuuteen. [7.]

3 Laivojen päästövaatimukset

Kansainvälinen merenkulkuorganisaatio (International Maritime Organization, IMO) laatii merenkulun ympäristönsuojelumääräykset. Nämä säädökset koskevat lähinnä kansainvälisessä meriliikenteessä olevia aluksia. Lisäksi valtioilla on omia säädöksiään. Suomessa kansainvälistä merenkulkua säätelevät merenkulun ympäristönsuojelulaki ja valtioneuvoston asetus merenkulun ympäristönsuojelusta. [8, s. 4.]

MARPOL 73/78 yleissopimus on vuonna 1973 tehty alusten meren pilaantumisen ehkäisemiseksi tehty sopimus. Siihen on myöhemmin tehty muutoksia ja lisäyksiä. Yleissopimukseen kuuluu kuusi liitettä, joista liite VI käsittelee ilman suojelua ja alusten energiatehokkuutta. [8, s. 5.]

3.1 Typen oksidit (NO_x)

MARPOL-yleissopimuksen VI liitteen säännössä 13 määritellään NO_x-päästörajoitukset uusiin aluksiin asennettaville dieselmootoreille. Rajoituksia on porrastettu (Tier I, II ja III) aluksen valmistumisajankohdan mukaan. Tier III -rajoitukset koskevat aluksia, joiden pituus on yli 24 m ja joihin on asennettu dieselmoottori, jonka teho on enemmän kuin 130 kW (n. 174 hv) ja jotka purjehtivat NO_x-päästöjen valvonta-alueilla (ECA-alueet), jotka on esitetty kuvassa 2. [8.]



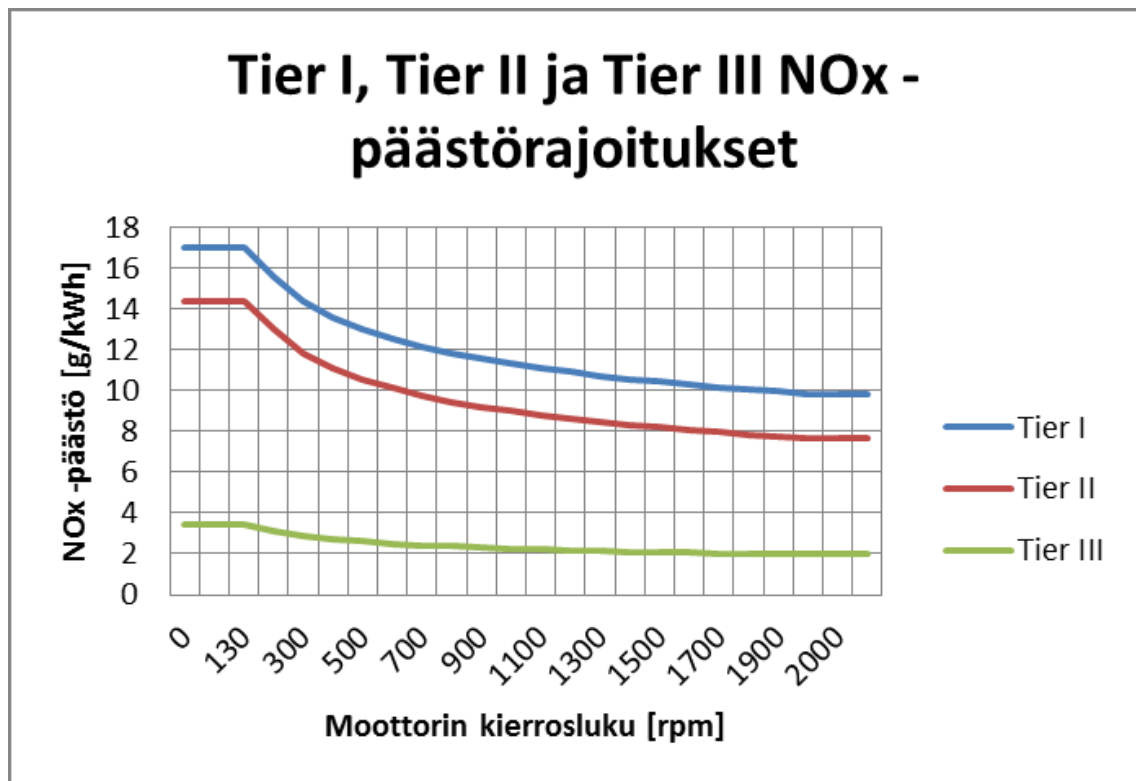
Kuva 2. ECA-alueet eli NO_x-päästöjen valvonta-alueet [8.]

Rajoitukset on jaoteltu moottorin kierrosluvun (n) perusteella alla olevan taulukon 1 mukaan [9].

Taulukko 1. NO_x-päästörajat moottorin kierrosluvun mukaan [9].

Tier	Ship construction date on or after	Total weighted cycle emission limit (g/kWh) n = engine's rated speed (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 January 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 January 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ e.g., 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 January 2016	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ e.g., 720 rpm – 2.4	2.0

MARPOL-yleissopimuksen mukaiset päästörajat on esitetty myös kaaviona alla olevassa kuvassa 3. [8.].



Kuva 3. MARPOL-yleissopimuksen VI liitteen NO_x-päästörajat [8].

3.2 Rikin oksidit (SO_x)

Rikkipäästöjen rajoitukset määritellään polttoaineen rikkipitoisuuden perusteella. MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI säännössä määritellään SO_x-päästörajat alla olevan kuvan 4 mukaan. [10.] Näihin rajoihin voidaan päästä, joko käyttämällä vähärikkistä polttoainetta tai vaihtoehtoisesti rikkipesurin avulla.

Outside an ECA established to limit SO_x and particulate matter emissions	Inside an ECA established to limit SO_x and particulate matter emissions
4.50% m/m prior to 1 January 2012	1.50% m/m prior to 1 July 2010
3.50% m/m on and after 1 January 2012	1.00% m/m on and after 1 July 2010
0.50% m/m on and after 1 January 2020*	0.10% m/m on and after 1 January 2015

Kuva 4. Polttoaineen rikkipitoisuusrajoitukset IMO:n päästörajoitusalueilla (ECA) ja niiden ulkopuolella [10].

MARPOL-yleissopimuksessa määriteltyjen rajojen ja rajoitusalueiden lisäksi säätelijänä toimii EU:n direktiivi, jonka mukaan satamassa olevien laivojen tulee käyttää polttoainetta, joka sisältää enintään 0,1 % rikkiä sekä valtiolliset rajoitukset esimerkiksi Kiinan ja Korean alueella, joissa rikkipitoisuusraja vaihtelee 0,1 %:n ja 0,5 %:n välillä. Kuvassa 5 on esitetty nykyiset rajoitusalueet (ECA-alueet) sekä mahdolliset tulevat alueet. [11.]

Taulukko 2. EU:n sisävesiliikenteen päästörajat [13.]

CATEGORY	NET POWER	DATE	CO	HC ^a	NO _x	PM	PN
	kW						
IWP/IWA-v/c-1	19 ≤ P < 75	2019	5.00	4.70 ^b		0.30	-
IWP/IWA-v/c-2	75 ≤ P < 130	2019	5.00	5.40 ^b		0.14	-
IWP/IWA-v/c-3	130 ≤ P < 300	2019	3.50	1.00	2.10	0.10	-
IWP/IWA-v/c-4	P ≥ 300	2020	3.50	0.19	1.80	0.015	1x10 ¹²
^a A = 6.00 for gas engines			^b HC + NO _x				

4 Laivassa käytettävät polttoaineet

Laivakäyttöön tarkoitettujen polttoaineiden vaatimuksia määrittelee pääasiassa ISO 8217:2017 -standardi. Standardi jaottelee polttoaineet tislattuihin polttoaineisiin ja jäännöspolttoaineisiin. Päästöjen kannalta merkittävä asia polttoaineissa on sen rikki-pitoisuus.

4.1 Jäännöspolttoaineet (Residual marine fuels)

Jäännöspolttoaineet ovat nimensä mukaisesti öljynjalostuksen jäännöstuotteita, jotka jäävät jäljelle raakaöljyn tislauksprosessista. Raskaan polttoöljyn (Heavy fuel oil, HFO) eri laadut kuuluvat jäännöspolttoaineisiin. Ominaisista näille polttoaineille on lähtökohtaisesti korkea rikki-pitoisuus sekä viskositeetti, ja tästä syystä ne tarvitsevat lämmitetyn polttoainejärjestelmän. Rikki-pitoisuutta on mahdollista alentaa, mutta se puolestaan nostaa polttoaineen hintaa. [14.]

4.2 Tislatut polttoaineet (Distillate marine fuels)

Pääosin tai pelkästään tisleistä koostuvia polttoaineita kutsutaan polttoöljyiksi tai kaasuöljyiksi (Marine gas oil, MGO). Viskositeetti sekä rikkipitoisuus ovat jäännöspolttoaineita huomattavasti alhaisempia eikä polttoainejärjestelmän lämmitystä yleensä tarvita. Meridiesel (Marine diesel oil, MDO) on jäännöspolttoaineen ja tisleen sekoitus, ja sitä on saatavilla eri rikkipitoisuuksina. [14.]

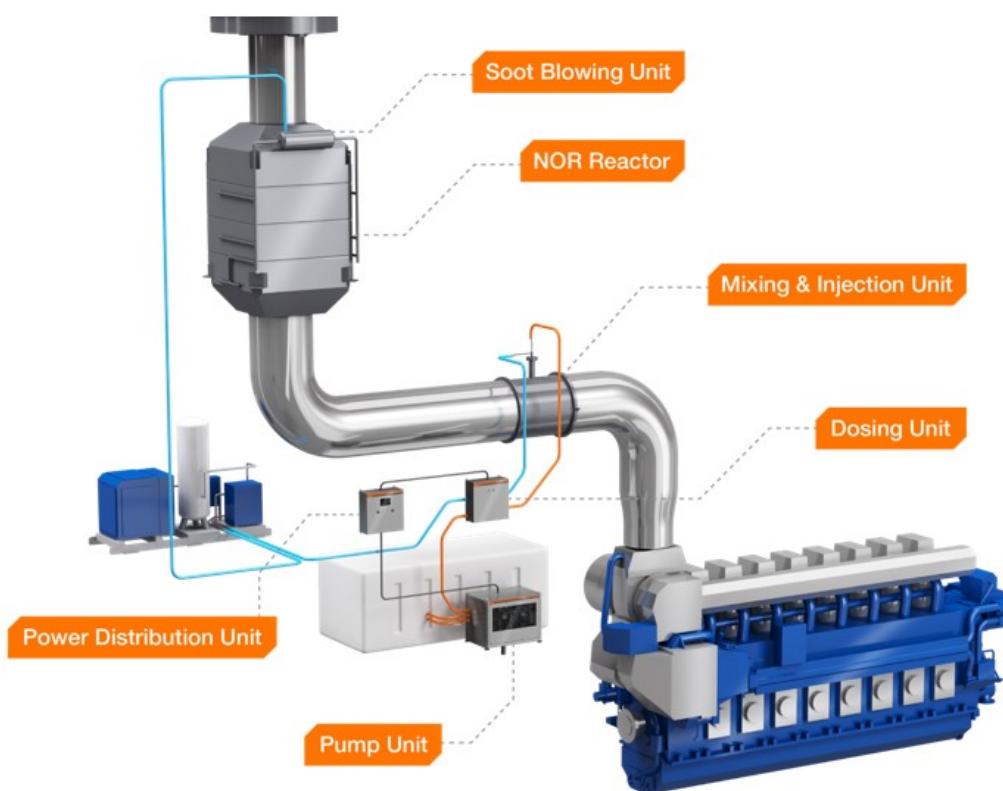
4.3 Nesteytetty maakaasu (LNG)

Nesteytetty maakaasu koostuu pääasiassa metaanista. Kun maakaasua jäähdytetään normaalissa ilmanpaineessa -160 °C :seen, sen olomuoto muuttuu nestemäiseksi ja sen tilantarve on noin 1/600 kaasumaiseen olomuotoon verrattuna. Ennen nesteytystä kaasu on puhdistettava, minkä jälkeen se jäähdytetään. Tämä puhdistus- ja jäähdytysprosessin kuluttama energiamäärä vastaa noin 25 % kaasun sisältämästä energiasta. Nesteytetyn maakaasun käyttö on lisääntynyt laivoissa vaihtoehtoisena polttoaineena, koska sen aiheuttamat CO_2 -, NO_x -, SO_x - ja pienhiukkaspäästöt ovat öljypohjaisia polttoaineita alhaisemmat. Alhaisempi CO_2 -päästö johtuu maakaasun suuresta vetypitoisuudesta ja alhaisesta hiilipitoisuudesta. Metaanissa yhteen hiiliatomiin on sitoutunut neljä vetyatomia. LNG:n käyttöön liittyy kuitenkin metaanipäästöt (methane slip), jotka johtuvat pääasiassa epätäydellisestä palamisesta tai sylinterien kautta tapahtuvasta vuodosta. Metaanipäästöjä on pystytty vähentämään merkittävästi moottoritekniikan kehittymisen myötä. 1990-luvulla kehitetyissä moottoreissa päästöt olivat noin 16 g/kWh, kun taas nykymoottoreissa puhutaan 2–3 g/kWh metaanipäästöistä. Metaani on hiilidioksiiniin verrattuna 25 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu, joten sen pääsy ilmakehään on erityisen haitallista. Toisaalta metaani häviää ilmakehästä huomattavasti hiilidioksidia nopeammin. [14.]

5 Pakokaasunpuhdistusmenetelmät

5.1 Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (SCR)

Selektiivisellä katalyyttisella pelkistämällä eli SCR-järjestelmällä voidaan vähentää NO_x-päästöjä yli 90 % ja saavuttaa Tier III -päästörajoitukset tarvittavilla alueilla. Järjestelmän teho perustuu reaktioon, jossa lisäaineen ja katalyytin avulla haitalliset typen oksidit saadaan muunnettua typeksi ja vedeksi. Teollisuudessa lisäaineena käytetään yleisesti ammoniakkia, mutta turvallisuussyistä laivakäytössä lisäaineena on yleensä 40 massaprosenttinen urealiuos. Alla olevassa kuvassa 7 on esitetty SCR-järjestelmä. [15.]

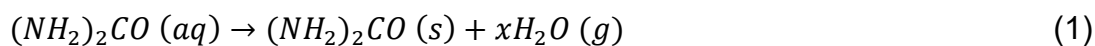


Kuva 6. SCR-järjestelmä [15].

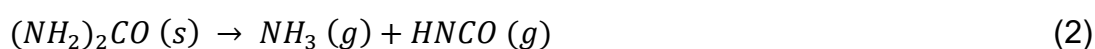
Urealiuos suihkutetaan kuumaan pakokaasuvirtaan, jolloin vettä haihtuu urealiuoksesta, urea hajoaa lämmön vaikutuksesta ja muodostuu ammoniakkia, joka

on valmis reagoimaan typen oksidien kanssa muodostaen lopulta alkuainetyyppeä, vettä sekä pienen määrän hiilidioksidia. Reaktiot on esitetty alla. [16.]

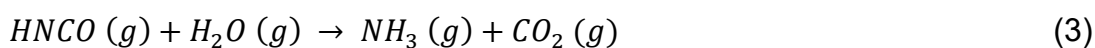
Urean ja veden liuksesta haihtuu vettä, jolloin muodostuu kiinteää ureaa sekä vesihöyryä.



Kiinteä urea hajoaa lämmön vaikutuksesta ammoniakiksi ja isosyaanihapoksi.



Isosyaanihappo hydrolysoituu ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi.



Kun pakokaasu, johon on sekoittunut ammoniakkia, kohtaa katalyyttipinnan, reagoivat pakokaasun sisältämät typen oksidit ammoniakin kanssa seuraavasti.



Reaktioyhtälö 5 kuvaa yleisintä reaktiota, sillä suurin osa typen oksideista on typipimonoksidia. [16.]

Urean hyvä sekoittuminen on tärkeässä roolissa, jotta mahdollisimman suuri osa haitallisista typpioksideista reagoisi puhtaaksi typeksi. Lisäksi mahdollisim-

man esteetön virtaus edesauttaa tasaista ureapitoisuutta pakokaasuissa. Pakoputkeen on myös mahdollista asentaa tarvittaessa sekoitin, tai joissain järjestelmissä urea sekoitetaan ilman kanssa ennen suihkutusta. [17.]

Urean määrä pakokaasussa tulee olla tarkkaan säädelty, koska alhainen ureapitoisuus johtaa korkeisiin NO_x -päästöihin. Toisaalta liian korkea ureapitoisuus saa aikaan reagoimattoman ammoniakkin pääsyn ilmaan. Ammoniakki on myös ilmansaaste, ja se saattaa aiheuttaa korroosiota pakoputkistossa. Oikea urean ruiskutusmäärä määritetään laitteiston testiajossa perustuen tarvittavaan NO_x -päästövähennykseen. Pakoputkeen voidaan asentaa NO_x -sensorit ennen ja jälkeen katalysaattoriyksikön, ja tällä seurataan typen oksidien määriä. [17.]

SCR-järjestelmän haasteena saattaa olla suorituskyky kylmänä, esimerkiksi alhaisilla kuormituksilla, kun pakokaasuvirran lämpötila on alhainen. Tällöin tarpeeksi vettä ei ehdi haihtua urealiuoksesta tai riittävästi ammoniakkia ei ehdi muodostua ja reaktiot katalysaattorissa tapahtuvat liian hitaasti. Tyypillisesti pakokaasujen pitää olla vähintään noin $200\text{ }^\circ\text{C}$, jotta typen oksidien vähennys olisi merkittävä ja yli $300\text{ }^\circ\text{C}$, jotta päästäisiin yli 90 %:n vähennykseen. Jos lämpötila on liian alhainen, voidaan urean syöttö joutua katkaisemaan, jottei katalyytipinta likaannu ammoniumnitraatista, jota saattaa muodostua, jos urea ei hydrolysoitu täydellisesti alhaisen lämpötilan johdosta. Lisäksi huomioon tulee ottaa urean ohjeellinen varastointilämpötila $0\text{--}35\text{ }^\circ\text{C}$. Urean käyttöikä on $0\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$:ssa noin 18 kuukautta. Suunnittelussa kannattaa minimilämpötila asettaa esimerkiksi $+5\text{ }^\circ\text{C}$:seen. Jos lämpötila nousee yli $+35\text{ }^\circ\text{C}$:n, niin liuoksen käyttöikä romahtaa. [18.]

Polttoaineen rikkipitoisuudella on myös vaikutusta katalyytin likaantumiseen. Jos polttoaineen rikkipitoisuus on korkea, vaatii se korkeaa pakokaasun lämpötilaa. Jos pakokaasujen lämpötila jää alhaiseksi, ei ureaa voida annostella, koska tällöin katalyytin pinnalle voi muodostua kiinteää ammoniumbisulfaattia. Myös polttoaineen epäpuhtaudesta johtuvan tuhkan muodostuminen haittaa katalyytin toimintaa. Tämän takia tuhkan/karstan poistoon tarvitaan oma nuohouslaitteensa (soot blower), joka saattaa olla integroituna SCR-laitekokonaisuudessa [18.]

Lämpötilan yläraja SCR:n toiminnan kannalta on noin 400–450 °C. Tätä korkeammassa lämpötiloissa lisäaineen kulutus kasvaa, koska osa ammoniakista palaa ja yli 500 °C:n lämpötila voi johtaa katalyyttimateriaalin tuhoutumiseen. Lisäksi korkeissa lämpötiloissa saattaa pakokaasuissa tapahtua epätoivottuja reaktioita, kuten SO₂:n muuntuminen SO₃:ksi. [18.]

Katalyyttimateriaaleja on useita eri vaihtoehtoja eri käyttötarkoituksiin. Kuvassa 8 on muutama esimerkki materiaaleista sekä niiden käyttölämpötiloista. Vanadium ja zeoliitit ovat yleisesti käytettyjä katalyyttimateriaaleja niiden sopivan käyttölämpötilan vuoksi. [17.]

Catalyst	Temperature Range, °C
Platinum (Pt)	175 - 250
Vanadium (V ₂ O ₅)	300 - 450
Zeolite, high temperature (Fe)	350 - 600
Zeolite, low temperature (Cu)	150 - 450

Kuva 7. Katalyyttimateriaaleja ja niiden käyttölämpötiloja [17].

SCR-järjestelmän käyttö- ja huoltokustannukset ovat noin 5–7 €/MWh. Suurin yksittäinen kustannus tulee lisäaineesta, jota kuluu noin 15 l/MWh. Huoltokustannukset muodostuvat säännöllisestä järjestelmän puhdistuksesta, johon kuuluu esimerkiksi itse reaktorin puhdistus, jotta katalyyttipinta pysyy puhtaana, sekä ureajärjestelmän suodattimien ja suuttimien puhdistus. Lisäksi katalyytin kuntoa tulee seurata säännöllisesti. Sen normaali käyttöikä on 4–6 vuotta. Järjestelmän hankintakustannus on noin 50–90 €/kWh [17].

5.2 Pakokaasupesuri (Scrubber)

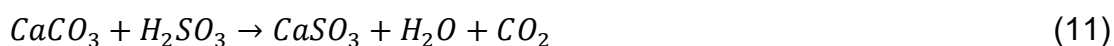
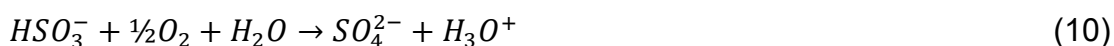
Pakokaasupesurit jaetaan kuiva- ja märkäpesureihin. Kuivapesurin toiminta perustuu pakokaasun sekaan suihkutettavaan sorbenttiin, joka sitoo haitallisia aineita pakokaasusta. Haitalliset aineet itseensä sitonut sorbentti kerätään ja säilötään laivassa, kunnes se viedään maalle jatkokäsittelyä varten. [19.]

Märkäpesuri puolestaan käyttää merivettä tai makeaa vettä, johon on lisätty alkalia eli emäksistä lisäainetta, jota suihkutetaan pakokaasun sekaan. Haitallisia aineita, kuten rikin oksideja, liukenee veteen tai alkaliin ja neutraloituu. Avoimen kierron pesurissa käytetään pelkkää merivettä ja suljetun kierron pesurissa makeaa vettä lisättynä alkalilla. Lisäksi on olemassa hybridipesureita, joita voidaan käyttää suljetulla sekä avoimella kierrolla. [19.]

Avoimen kierron pesureissa käytetty vesi puhdistetaan laivassa ja ohjataan takaisin mereen. Suljetun kierron pesurissa on mahdollista, ettei käytettyä vettä päästetä ollenkaan takaisin mereen tai vain pieni osa siitä pumpataan takaisin puhdistamisen jälkeen. Märkäpesurien rikin oksidien puhdistuskyky on noin 97–99 %. Tämä vastaa 0,1 % rikkiä sisältävän polttoaineen käyttöä eli laivaa voidaan operoida päästörajoitusalueilla. Lisäksi pakokaasupesuri vähentää pienhiukkaspäästöjä noin 70–80 %. Märkäpesurit ovat huomattavasti yleisempiä laivakäytössä verrattuna kuivapesureihin, mutta muutamia kuivapesuriratkaisujakin on saatavilla. [18.]

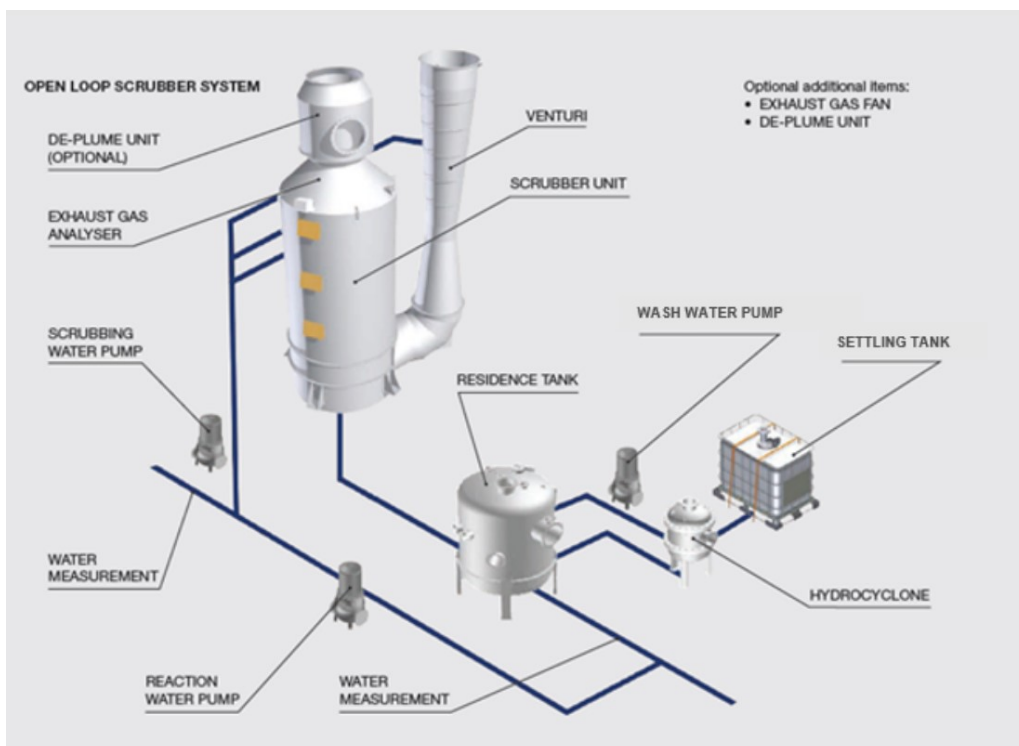
5.2.1 Avoimen kierron märkäpesuri (Open loop scrubber)

Avoimen kierron märkäpesuri käyttää meriveden luonnollista emäksisyyttä poistaakseen haitallisia rikin oksideja pakokaasuvirrasta. Vaadittava meriveden alkalipitoisuus on yli 2000 $\mu\text{mol/l}$. Merivedessä olevat vetykarbonaatti eli bikarbonaatti (HCO_3^-) sekä karbonaatti (CO_3^{2-}) reagoivat pakokaasujen rikin kanssa muodostaen sulfaatteja (SO_4^{2-}), joita esiintyy luonnostaankin merivedessä. Alla on esitetty reaktioyhtälöt. [19.]



Avoimen järjestelmän kokoonpano on suhteellisen yksinkertainen. Pääkomponentteja ovat itse pesuriyksikkö, vedenkäsittelylaitteisto, selkeytystankki (settling tank) sekä tarvittavat pumput. Esimerkkijärjestelmässä pakokaasu virtaa pesuriyksikköön venturiputkea pitkin, jossa se joutuu ensimmäisen kerran kosketuksiin pesuriveden kanssa. Suurin osa pienhiukkasista puhdistuu jo tässä vaiheessa. Seuraavaksi pakokaasu virtaa itse pesuriin, jossa suihkutetaan lisää pesuvettä pakokaasun joukkoon. Vedenkulutus on yleensä noin 45 m³/MWh ja tarvittava pumppausteho on noin 1–2 % käytössä olevasta konetehosta. Pesuprosessia seurataan sisään menevän ja ulostulevan veden arvoja monitoroimalla. [18.]

Likainen pesuvesi virtaa erotustankkiin (residence tank), jossa siitä poistuu ylimääräinen kaasu ja ilma, jotta seuraavassa vaiheessa vedestä saadaan poistettua epäpuhtaudet ja pienhiukkaset paremmin hydro syklonin avulla. Hydro sykloni erottelee haitalliset aineet erilliseen selkeytystankkiin (settling tank), ja puhdistettu vesi voidaan laskea takaisin mereen. Mereen laskettavan veden puhtautta monitoroidaan jatkuvasti. Järjestelmässä on mahdollista olla mukana myös vesihöyryn poistoyksikkö (De-plume unit), joka poistaa ylimääräisen vesihöyryn pakokaasusta pesuriyksikön jälkeen. Näin vähennetään pakoputkiston korroosiota. Kuvassa 9 on esimerkki avoimen kierron märkäpesurijärjestelmästä. [21.]

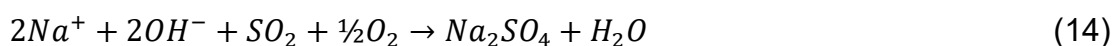


Kuva 8. Esimerkki avoimen kierron märkäpesurijärjestelmästä [21].

5.2.2 Suljetun kierron märkäpesuri (Closed loop scrubber)

Suljetun kierron pesurit pumppaavat makeaa vettä suljetussa kierrossa. Veteen lisätään alkalista kemikaalia rikin oksidien neutraloinniksi. Yleensä kemikaalina käytetään lipeää (NaOH), mutta turvallisuussyistä myös magnesiumhydroksidin ($Mg(OH)_2$) käyttö on mahdollinen. [21.]

Rikin oksidit neutraloituvat puhdistusprosessissa vaarattomiksi rikkisulfaateiksi (Na_2SO_4), jotka voidaan laskea mereen. Prosessin reaktioyhtälöt on esitetty alla. [19.]

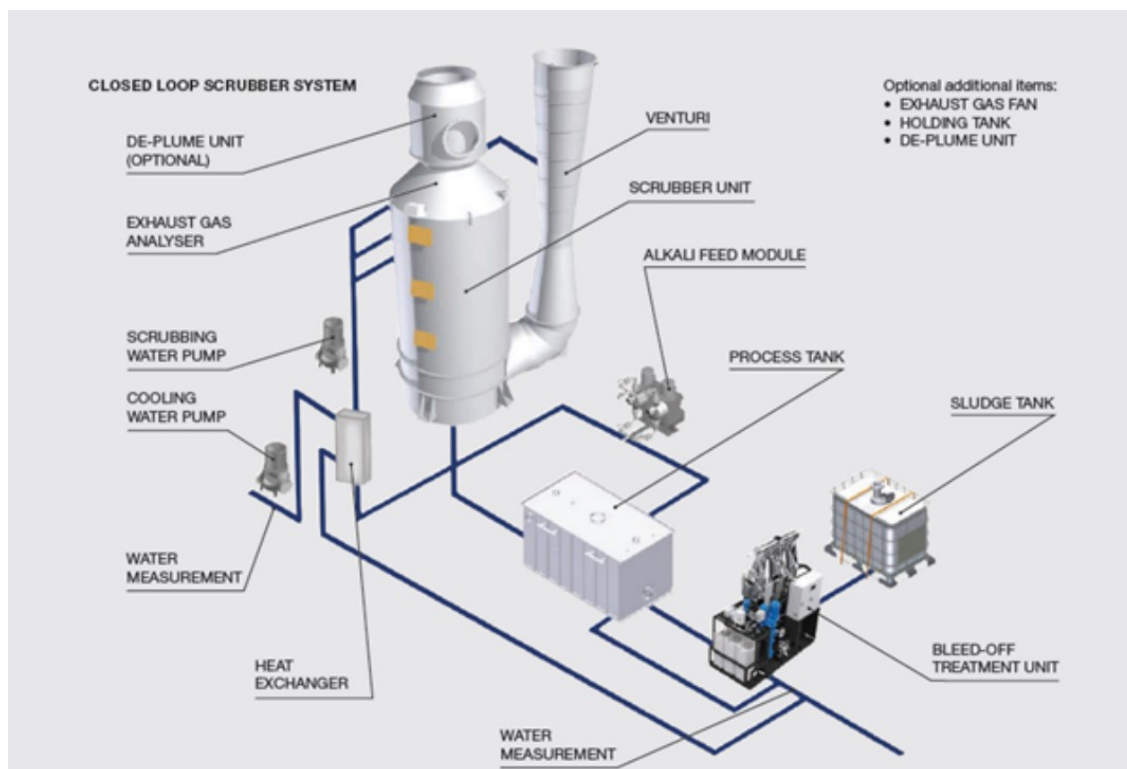




Suljetun kierron pesurisysteemiin kuuluu avoimen kierron järjestelmän pääkomponenttien lisäksi alkalinen säilytystankki ja annosteluyksikkö, korvausvesipumppu sekä lämmönvaihdin ja siihen tarvittava pumppu. Yleensä lisäaineena käytetään 50-prosenttista lipeäliuosta, ja sen kulutus on riippuvainen polttoaineen rikki- ja sulfaattipitoisuudesta siten, että kulutus on noin 5 l /MWh/S%. Magnesiumhydroksidin kulutus noin 25 % vähemmän. Tarvittava pumppausteho on suljetun kierron systeemissä noin 0,5–1 % käytettävästä konetehosta. [20.]

Pesurin jälkeen pesuvesi menee prosessitankkiin, josta suurin osa pumpataan takaisin kiertoon ja pieni osa menee vedenpuhdistusyksikön kautta mereen. Takaisin kiertoon pumpattu pesuvesi jäähdytetään lämmönvaihtimessa ennen pesuriin pumppausta. Jäähdytyksen tarkoitus on minimoida puhdistetun pakokaasun vesipitoisuus pesurin jälkeen. Näin puhdistusvettä menee mahdollisimman vähän hukkaan ja pakoputkiston korroosio vähenee. [21.]

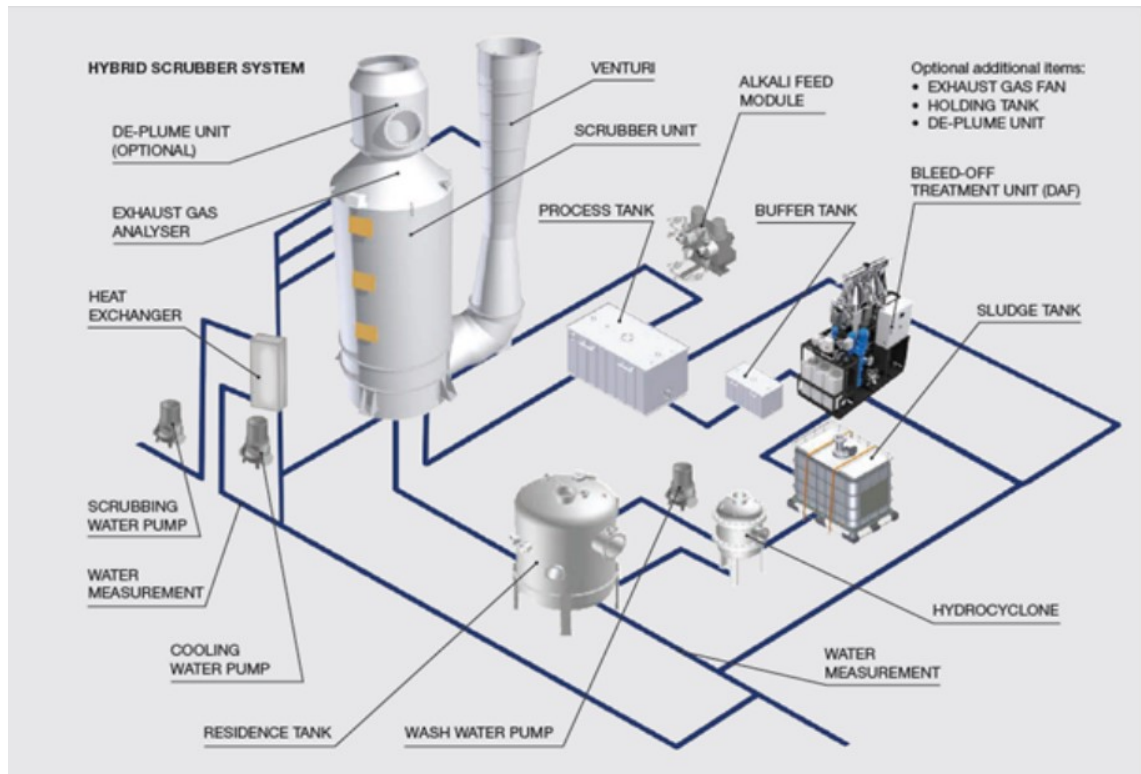
Suljetun kierron systeemissä pieni määrä puhdistusvettä lasketaan mereen, jotta pakokaasujen puhdistusteho säilyy hyvänä. Ennen mereen laskua vesi puhdistetaan omassa puhdistusyksikössään (bleed-off treatment unit) ja tilalle pumpataan puhdasta merivettä korvausvesipumpulla. Mereen laskettavan puhdistusveden määrä on yleensä luokkaa 0,1–0,3 m³/MWh. Mereen laskettava puhdistusvesi on myös mahdollista pumpata erilliseen keräyssäiliöön (zero discharge mode) alueilla, joilla edes puhdistettua jätevettä ei saa laskea mereen. Suljetun kierron pakokaasupesuri on esitetty alla kuvassa 10. [21.]



Kuva 9. Esimerkki suljetun kierron pakokaasupesurista [21].

5.2.3 Hybridi pakokaasupesuri (Hybrid scrubber)

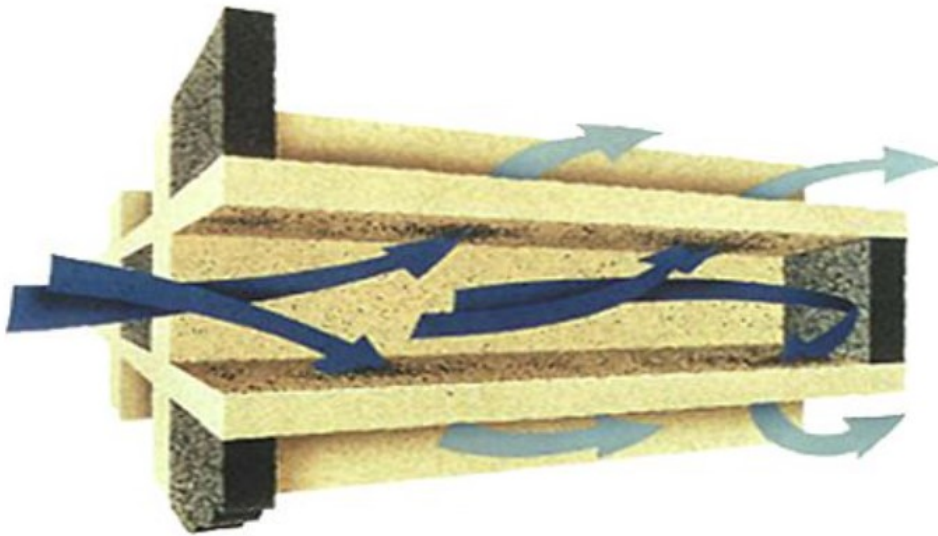
Hybridipesuri on yhdistelmä edellä kuvatuista järjestelmistä, jota voidaan käyttää vaihtoehtoisesti niin avoimella kierrolla kuin suljetulla kierrollakin. Se on käyttökelpoinen vaihtoehto, jos laiva operoi paljon rajoitusalueiden ulkopuolella ja korkean alkalipitoisuuden alueilla, mutta jonka tarvitsee silloin tällöin käydä alueilla, joilla meriveden alkalipitoisuus on liian matala tai päästörajoitukset edellyttävät. Esimerkiksi Itämeren alueella meriveden alkalipitoisuus ei riitä avoimen kierron pesurille. [18.] Kuvassa 11 on esitetty kuva hybridijärjestelmästä.



Kuva 10. Hybridipakokaasupesurijärjestelmä [21].

5.3 Dieselhiukkassuodatin (DPF)

Dieselhiukkassuodattimen toiminta perustuu nimensä mukaisesti tuhkan, hiilen ja muiden pienhiukkasten fyysiseen suodattamiseen pakokaasuvirrasta. ON olemassa useita eri suodatinmateriaaleja sekä -koonpanoja. Yleinen suodatusratkaisu on keraaminen kenno, jonka kanavat on tulpattu vastakkaisista päistä, jolloin pakokaasun on pakko virrata huokoisen seinämateriaalin läpi ja pienhiukkaset jäävät suodattimen sisään. Hiukkassuodattimella saavutetaan yleensä noin 70–95 %:n vähennys pienhiukkaspäästöihin. Alla kuva 12 DPF-suodattimen rakenteesta. [22.]



Kuva 11. Yleinen dieselhiukkassuodattimen rakenne [22].

Hiukkassuodattimen haasteena on muun muassa melko suuri paineen lasku. Pienhiukkasmassa kertyy suodatinpinnalle ja tukkii suodattimen, jolloin paine suodattimessa nousee, mikä puolestaan johtaa vastapaineen nousuun moottorin puolella. Tästä syystä suodatin pitää aika ajoin regeneroida eli poistaa kertynyt hiukkasmassa tukkimasta suodatinta. [23.]

Regenerointi voidaan tehdä hapettamalla kertynyt noki hiilidioksidiksi joko hapen (O_2) tai typpioksidin (NO_2) kanssa. Happea on yleensä riittävä määrä dieselmoottorin pakokaasussa, mutta lämpötila, joka regeneraatioon tarvitaan, on $600\text{ }^\circ\text{C}$. Typpioksidin avulla tapahtuva regeneraatio vaatii huomattavasti alhaisempaa lämpötilaa ($260\text{ }^\circ\text{C}$), mutta typpioksidia ei yleensä ole riittävästi pakokaasussa. [23.]

Regeneraatiovaihtoehdot jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin. Seuraavista esimerkeistä pakokaasun lämmittäminen kuuluu aktiivisiin keinoihin ja suodattimen katalyyttipinnoite sekä polttoaineen lisäaine passiivisiin keinoihin. Pakokaasun lämpötilaa voidaan lisätä koneteknisin keinoin tai lämmittämällä pakokaasuja esimerkiksi polttimella. Toisaalta vaadittava regeneraatiolämpötilaa voidaan laskea esimerkiksi käyttämällä katalyyttipinnoitetta suodattimessa tai polttoaineen

lisäaineella, joka laskee noen syttymislämpötilaa. Lisäksi typpioksidin määrä pakokaasussa voidaan lisätä esimerkiksi asentamalla typpioksidia muodostava hapetuskatalysaattori (Diesel oxidation catalyst) ennen hiukkassuodatinta. [23.]

Laivakäyttöön tarkoitettuihin keskinopeisiin dieselmootoreihin soveltuvia pienhiukkassuodattimia ei ole toistaiseksi juurikaan saatavilla. Päällimmäisinä haasteina ilmeisesti käytettävien polttoaineiden rikki- ja hiilipitoisuus, joka tukkii suodattimen nopeasti, suodattimen kokovaatimus sekä vastapaineen muodostus, jonka yläraja meridieselmootoreissa on suhteellisen alhainen (30–50 mbar). [24.]

Muutamia esimerkkejä merialuksista, joihin on asennettu DPF, kuitenkin löytyy. Queen Victoria risteilyaluksessa on käytössä katalysoitu suodatin ja laivaan on asennettu yhteensä 8,6 MW:n konetehto. Saavutetut PM-vähennykset olivat 80–92 %, ja tuhkanpoisto suodattimesta tapahtui paineilmapulsseilla 10 tunnin välein. Näin saatiin vastapaine pysymään siedettävässä 30 mbar:ssa. [25.]

Muita hiukkassuodattimien varustettuja vastaavan tai suuremman kokoluokan aluksia on muun muassa REV Ocean ja Voltaire. REV Ocean on 182 m pitkä ja yhteensä 13 MW:n koneteholla varustettu jahti. Voltaire puolestaan on 169 m pitkä tuulivoimalan turbiinin asennusalus, jonka konetehto on yhteensä 25 MW. Kyseisten laivojen hiukkassuodattimien toimittaja on erikoistunut suurempitehoisten moottorien hiukkassuodattimiin. Tehokkaampien moottorien hiukkassuodattimen regeneraatio toteutetaan käyttäen pakokaasun lämmitystä polttimen avulla. [26.]

6 Laskentatyökalun kehittäminen

Yksi insinööriyön tavoitteista oli kehittää telakalla jo olemassa olevaa Excel-laskentatyökalua siten, että työkaluun lisätään pakokaasupäästöjen sekä pakokaasun puhdistusmenetelmien laskenta. Laskentatyökalua käytetään konseptivaiheessa laivan koneistoratkaisujen suunnitteluun. Nyt lisättävässä osiossa on tarkoitus laskea koneiston tuottamia pakokaasupäästöjä sekä puhdistusmenetelmien vaikutusta niihin. Tarkastelussa on CO₂-, NO_x- ja SO_x-päästöt sekä puhdistusmenetelminä SCR sekä skrubberi. Lisäksi on tarkoitus hahmottaa käytettävien lisäaineiden menekkiä sekä puhdistusmenetelmästä aiheutuvaa tehon tarvetta eli käyttöön vaikuttavia asioita. Näin nähdään eri vaihtoehtojen vaikutusta koneistoratkaisun kokonaisuuteen jo aikaisessa suunnitteluvaiheessa ja voidaan tehdä vertailua parhaan ratkaisun löytämiseksi.

Laskentatyökalussa on Ship definition -välilehti, jossa pystyy muun muassa määrittämään laivan käyttämät polttoaineet. Ensisijaisen polttoaineen lisäksi on mahdollista valita Dual fuel -moottoreiden käyttämät kaasupolttoaine sekä pilottipolttoaine, jota käytetään kaasun sytyttämiseen. Taulukossa olevat keltaiset solut ovat sellaisia, joita käyttäjä voi muokata, muut laskentatyökalu laskee itse. Alla kuva 13 polttoaineen valintakohdasta.

Fuel selection		
Primary fuel	MDO	<i>select from list</i>
Secondary fuel	LNG1_Light	<i>select from list (leave blank if not relevant), use this field always for gas fuel</i>
Pilot fuel	MDO	<i>select from list (leave blank if not relevant)</i>
Primary fuel LHV	42139	[kJ/kg]
Secondary fuel LHV	49870	[kJ/kg]
Pilot fuel LHV	42139	[kJ/kg]
Primary fuel density	890	[kg/m ³]
Secondary fuel density	435	[kg/m ³]
Pilot fuel density	890	[kg/m ³]

Kuva 12. Laivan käyttämien polttoaineiden valinta.

Excel-työkalun Machinery alternatives -välilehdellä voidaan valita kuusi eri koneistokokoonpanoa, joihin kuhunkin on mahdollista valita maksimissaan kolme eri dieselmootoria ja niiden lukumäärät kokoonpanossa. Lisäksi on mahdollista valita laivan propulsiokonsepti. Alla kuvassa 14 on ote kyseiseltä välilehdeltä.

POWER GENERATION	Alternative 1	Alternative 2	Alternative
Diesel generator type 1	MaK 6 M32E 750	W 6L32E2 CS 720 MainDE/CPP SCR	MAN 6L 32/44C
Diesel generator type 2			
Diesel generator type 3 (HDG/AE)			
Diesel generator type 1 power [kW]	3300	3360	3600
Diesel generator type 2 power [kW]	0	0	0
Diesel generator type 3 power [kW]	0	0	0
NO of generator type 1	4	4	4
NO of generator type 2	0	0	0
NO of generator type 3	0	0	0
Total installed power [kW]	13200	13440	14400
Power generation loading limit [%]	100 %	100 %	100 %
Power generation efficiency [%]	96 %	96 %	96 %
PROPULSION			
Propulsion concept	Diesel electric POD	Diesel electric POD	Diesel electric
Max propulsion power req. [kW]	8250	8250	8250
Propulsion motor type 1	Low speed electric	Low speed electric	Low speed ele
Propulsion motor type 2	0	0	0
Propulsion motor type 1 power req. [kW]	4125	4125	4125
Propulsion motor type 2 power req. [kW]	0	0	0
NO of propulsion units type 1	2	2	2
NO of propulsion units type 2	0	0	0
PTO power / battery [kW]			
NO of PTO / battery			
PTI power / battery [kW]			
NO of PTI / battery			

Kuva 13. Kuva Machinery alternatives -välilehdeltä.

Emission reduction technologies -välilehdeltä löytyy pakokaasunpuhdistusjärjestelmiin sekä pakokaasukomponentteihin liittyviä asioita. Alla olevassa kuvassa 15 nähdään SCR- ja rikkipesurijärjestelmille annettavia arvoja. SCR-järjestelmälle on mahdollista asettaa tarvittavan urealiuoksen kulutus sekä typen oksidien vähennysprosentti. Näitä arvoja käytetään tulevassa laskennassa.

Rikkipesurille puolestaan on mahdollista rikkioksidien vähennysprosentin lisäksi asettaa natriumhydroksidin ja magnesiumhydroksidin kulutus sekä avoimen

kierron pesurin tarvitsema merivesimäärä. Lisäksi pumppaustehon tarve voidaan määrittää prosentteina operointimoodin konetehosta solussa P_{pump} of P_{engine} .

SCR for Nox reduction			
Technologies		Description	
YES		used	
NO		not used	
consumables		amount	unit
Urea solution 40/60		15	l/MWh
Exhaust component effect		unit	Description
CO2			
Nox		90 %	reduction
Sox			
PM			
CH4			20-40% reduction
Scrubber for Sox reduction			
Technologies		Description	
Open loop scrubber		sea water	
Closed loop scrubber NaOH			
Closed loop scrubber MgOH			
consumables		amount	unit
Sea water flow open loop		45	m3/MWh
NaOH		5	l/MWh/s% _{f_o}
MgOH ²		75 %	of NaOH consumpt
Exhaust component effect		unit	Description
CO2			
Nox			
Sox		90 %	reduction
PM			70-90% reduction?
CH4			

Kuva 14. Puhdistusjärjestelmien vaikutukset sekä tarvittavat lisäaineet sekä pumppausteho.

Pakokaasukomponenttien laskennassa käytetyt polttoaineen kulutukseen pe-
rustuvat kertoimet löytyvät Emission reduction technologies -välilehdeltä ja on
esitetty kuvassa 16. Ylemmän taulukon kertoimet on poimittu tutkimuksesta,
jossa testattiin 197 merikäyttöön soveltuvaa dieselmoottoria ja mitattiin niiden

tuottamat pakokaasupäästöt eri komponentteineen. Moottorien päästökertoimet on jaettu moottorin tehon mukaan. Viimeistä teholuokkaa lukuun ottamatta moottorit olivat nelitahtisia, keskinopeita dieselmoottoreita. Viimeisessä teholuokassa moottorit olivat kaksitahtisia. [25.] Kertoimet vastaavat typen oksidien osalta melko hyvin päästöarvoja, jotka saadaan laskemalla moottorinvalmistajan tietojen perusteella, mikäli polttoaineena on MDO. Jos taas käytetään raskasta polttoöljyä, saadaan polttoaineeseen perustuvilla kertoimilla jonkin verran ilmoitettuja arvoja pienemmät päästömäärät.

Kuvan 16 alemman taulukon Dual fuel -moottoreiden polttoaineen kulutukseen pohjautuvat päästökertoimet on poimittu raportista, joka kokosi yhteen kuuden aluksen sekä yhden testimoottorin mittaustulokset [26]. Typen oksidien osalta kertoimet vaikuttavat vastaavat hyvin moottorivalmistajan arvoja. Kaasukäytössä metaanipäästöt voivat kuitenkin vaihdella paljon riippuen moottoritekniikasta.

Emission factors [kg/t _{to}] [1] (4-strk, MED Speed)						
P [kW]	13-600	601-1200	1201-2000	2001-4000	4001-10000	10001-26000(2-strk)
CO2	3140	3125	3125	3124	3166	3158
NOx	33,3	38,5	39,8	45,2	66,0	76,6
SOx[2]	10	10	10	10	10	10
PM						
CH4						
Emission factors [kg/t _{to}] [3] (LBSI & LPDF 4-strk)						
	LBSI	LPDF				
CO2	2687,3	2630,3				
NOx	5,1	10,4				
SOx[2]	0,0	0,0				
PM						
CH4	23,2	40,9				

Kuva 15. Päästöjen laskennassa käytettävät kertoimet.

Itse laskenta tapahtuu jokaisen koneistovaihtoehdon omalla välilehdellään, josta esimerkkipöytä alla (kuva 17). Kuvassa nähdään osio, joka laskee polttoaineen vuosittaisen kulutuksen jaettuna operointimoodeittain (Fast cruise, Economic

cruise, Slow cruise jne.). Käytettävä polttoaine sekä pilottipolttoaineen mahdollinen käyttö voidaan valita Ship definition -välilehdellä tehtyjen polttoainevalintojen mukaan.

Machinery alternative 6 calculation			
Machinery composition	TYPE	Power [kW]	
Engine type 1	W 8L34DF-B 720 IMO Tier2	3840	
Engine type 2	0	0	
Engine type 3 (HDG / AE)	0	0	
Propulsion motor type 1	Low speed electric	4300	
Propulsion motor type 2	0	0	
Bow thruster 1	Tunnel thruster	1600	
Bow thruster 2	Tunnel thruster	1600	
Stern thruster 1	Tunnel thruster	0	
Auxiliary boiler	Steam	1120	
Operational profile calculation			
MODE NAME	Fast Cruise	Economic cruise	Slo
ENGINE FUEL & LO ECONOMY			
MAIN FUEL TYPE	2	2	
LHV [kJ/kg]	49870	49870	
Density [kg/m3]	435	435	
PILOT FUEL TYPE	1	1	
LHV [kJ/kg]	42139	42139	
Density [kg/m3]	890	890	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 1 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 1 engine [g/kWh]	160,5	169,2	
PILOT FUEL CONSUMPTION type 1 engine [g/kWh]	2,6	3,3	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 2 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 2 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
PILOT FUEL CONSUMPTION type 2 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
MAIN FUEL CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
PILOT FUEL CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
TOTAL MAIN FUEL CONSUMPTION [t/a]	1514,2	3716,5	
TOTAL PILOT FUEL CONSUMPTION [t/a]	24,1	73,1	
LO CONSUMPTION type 1 engine [g/kWh]	0,35	0,35	
LO CONSUMPTION type 2 engine [g/kWh]	0,00	0,00	
LO CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0	0	

Kuva 16. Polttoaineen kulutuksen laskenta.

Polttoaineen kulutuksen laskennan alapuolelta löytyy pakokaasunpuhdistusjärjestelmien lisäaineiden kulutuslaskelma kohdassa Exhaust gas cleaning (kuva 18). Tässä voidaan valita mahdollinen SCR:n tai skrubberin käyttö. Skrubberivaihtoehtoina on avoimen kierron järjestelmä sekä suljettu kierto käyttäen joko NaOH:a tai MgOH:a lisäaineena. Tämän jälkeen työkalu laskee SCR:n tapauksessa urean kulutuksen ja suljetun kierron skrubberin tapauksessa joko

NaOH:n tai MgOH:n kulutukset perustuen operointimoodin käytössä olevaan konetehtoon (kuva 18).

Machinery alternative 6 calculation			
Machinery composition	TYPE	Power [kW]	
Engine type 1	W 8L34DF-B 720 IMO Tier2	3840	
Engine type 2	0	0	
Engine type 3 (HDG / AE)	0	0	
Propulsion motor type 1	Low speed electric	4300	
Propulsion motor type 2	0	0	
Bow thruster 1	Tunnel thruster	1600	
Bow thruster 2	Tunnel thruster	1600	
Stern thruster 1	Tunnel thruster	0	
Auxiliary boiler	Steam	1120	
Operational profile calculation			
MODE NAME	Fast Cruise	Economic cruise	Sl
PILOT FUEL CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0,0	0,0	
TOTAL MAIN FUEL CONSUMPTION [t/a]	1530,7	3716,5	
TOTAL PILOT FUEL CONSUMPTION [t/a]	24,1	73,1	
LO CONSUMPTION type 1 engine [g/kWh]	0,35	0,35	
LO CONSUMPTION type 2 engine [g/kWh]	0,00	0,00	
LO CONSUMPTION type 3 engine [g/kWh]	0	0	
TOTAL LO CONSUMPTION [t/a]	3,35	7,69	
EXHAUST GAS CLEANING			
SCR in use	YES	NO	
Scrubber in use	Closed loop scrubber NaOH		
DPF in use			
UREA CONSUMPTION [t/a]	160,7	0,0	
NaOH CONSUMPTION [t/a]	72,7	0,0	
MgOH ² CONSUMPTION [t/a]	0,0	0,0	
EXHAUST GASES			
Flow type 1 engine [kg/s]	4,4	4,4	
Temperature type 1 engine [°C]	343	343	
Flow type 2 engine [kg/s]			

Kuva 17. Pakokaasunpuhdistusjärjestelmän valinta sekä lisäaineiden laskenta.

Skрубberin ollessa valittuna lisätään aikaisemmin määritetty tarvittava pump-
pausteho koneistovaihtoehdon sähköteholaskelmaan (kuva 19).

ELECTRIC LOAD REQ			
Hotel load [kW]	3000	3000	30
Propulsion load [kW]	8323	3622	17
Transverse thruster load [kW]	0	0	
Scrubber load [kW]	154	0	
Additional loads [kW]	0	0	
Additional production [kW]			
Electric power generation efficiency	96 %	96 %	96
Total electric load [kW]	11955	6898	49

Kuva 18. Skrubberin vaatima pumppausteho.

Tämän jälkeen laskentatyökalu laskee päästöarvot operointiprofiileittain perustuen yllä tehtyihin valintoihin liittyen käytössä olevaan polttoaineeseen sekä valittuihin pakokaasunpuhdistusmenetelmiin (kuva 20).

Operational profile calculation			
MODE NAME	Fast Cruise	Economic cruise	Slow cruise
EMISSIONS			
CO2 [t/a]	4101	10004	2639
NOx [t/a]	1,7	41,6	10,9
SOx [t/a]	0,0	0,7	0,2
PM [t/a]			
CH4 [t/a]			

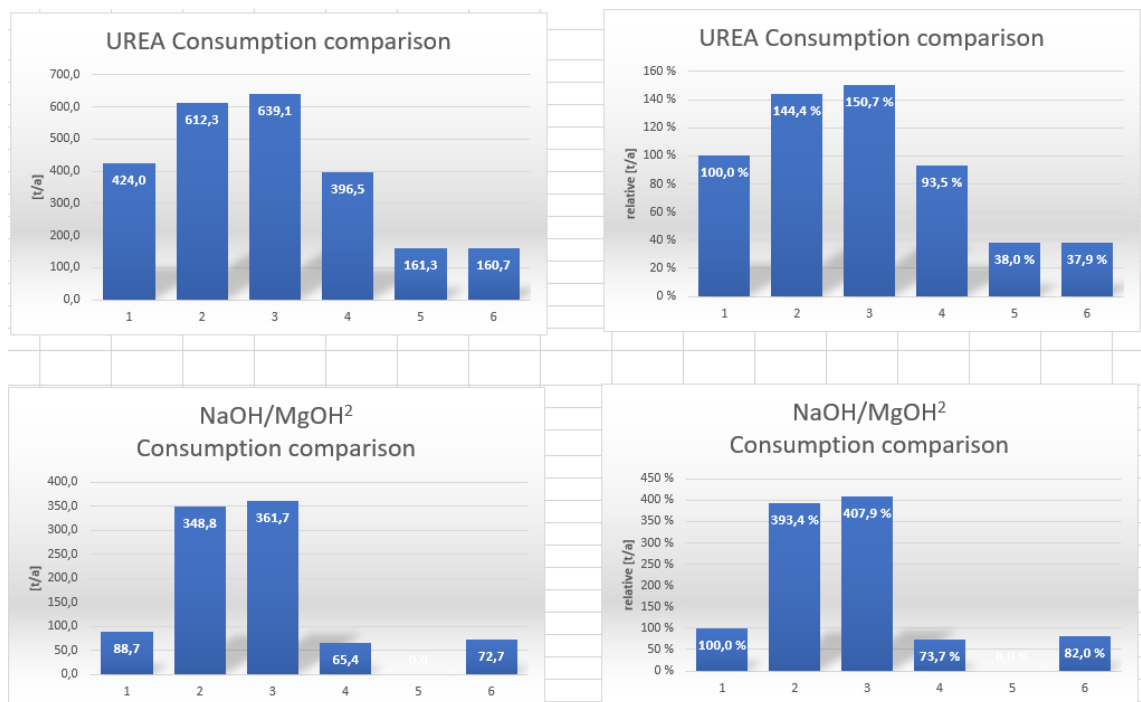
Kuva 19. Päästöarvojen laskenta operointiprofiileittain.

Lisäaineiden kulutuksista on numeraalinen yhteenveto ja diagrammiesitys Excel-työkalun Consumption comparison -välilehdellä (kuvat 21 ja 22). Diagrammiesitykset ovat havainnollisempia ja esimerkiksi potentiaaliselle asiakkaalle näytettäviä enemmän kuin numeraaliset taulukot.

UREA consumption comparison		MACHINERY ALTERNATIVES					
UREA CONSUMPTION VALUES	unit	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3	Alternative 4	Alternative 5	Alternative 6
Fast Cruise	[t/a]	160,4	0,0	0,0	0,0	0,0	160,7
Economic cruise	[t/a]	0,0	374,7	375,1	369,1	0,0	0,0
Slow cruise	[t/a]	100,2	100,2	100,3	0,0	0,0	0,0
Dynamic positioning	[t/a]	27,8	27,4	27,8	27,4	27,4	0,0
Maneuvering	[t/a]	25,8	0,0	25,8	0,0	25,4	0,0
Harbour / idling	[t/a]	109,9	110,0	110,1	0,0	108,5	0,0
TOTAL	[t/a]	424,0	612,3	639,1	396,5	161,3	160,7
Percentage representation	[%]	100 %	144 %	151 %	94 %	38 %	38 %

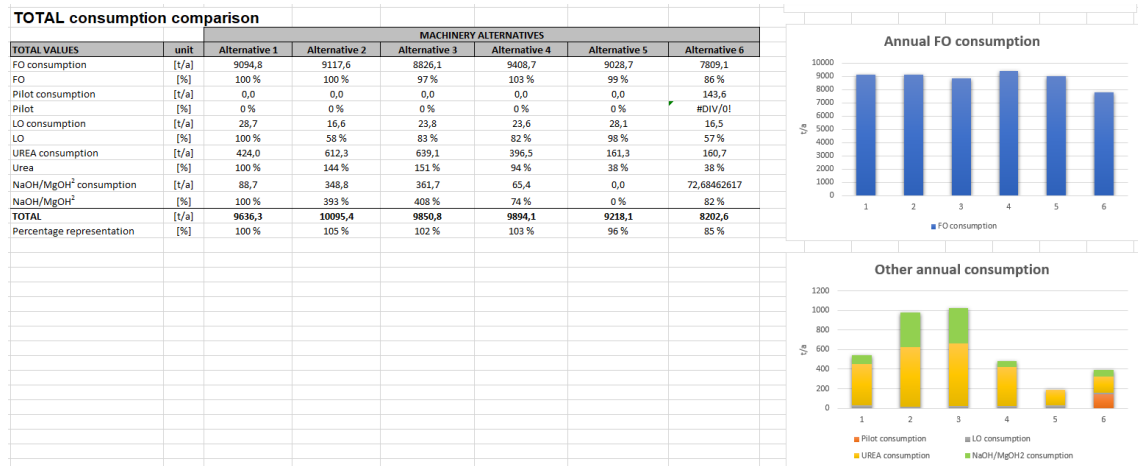
NaOH/MgOH ² consumption comparison		MACHINERY ALTERNATIVES					
NaOH/MgOH ² CONSUMPTION VA	unit	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3	Alternative 4	Alternative 5	Alternative 6
Fast Cruise	[t/a]	36,3	72,6	72,6	10,9	0,0	72,7
Economic cruise	[t/a]	0,0	169,5	169,7	0,0	0,0	0,0
Slow cruise	[t/a]	17,0	45,3	45,4	45,3	0,0	0,0
Dynamic positioning	[t/a]	4,7	0,0	12,6	0,0	0,0	0,0
Maneuvering	[t/a]	5,8	11,7	11,7	1,7	0,0	0,0
Harbour / idling	[t/a]	24,9	49,7	49,8	7,5	0,0	0,0
TOTAL	[t/a]	88,7	348,8	361,7	65,4	0,0	72,7
Percentage representation	[%]	100 %	393 %	408 %	74 %	0 %	82 %

Kuva 20. Numeraalinen lisäaineiden kulutusten vertailu.



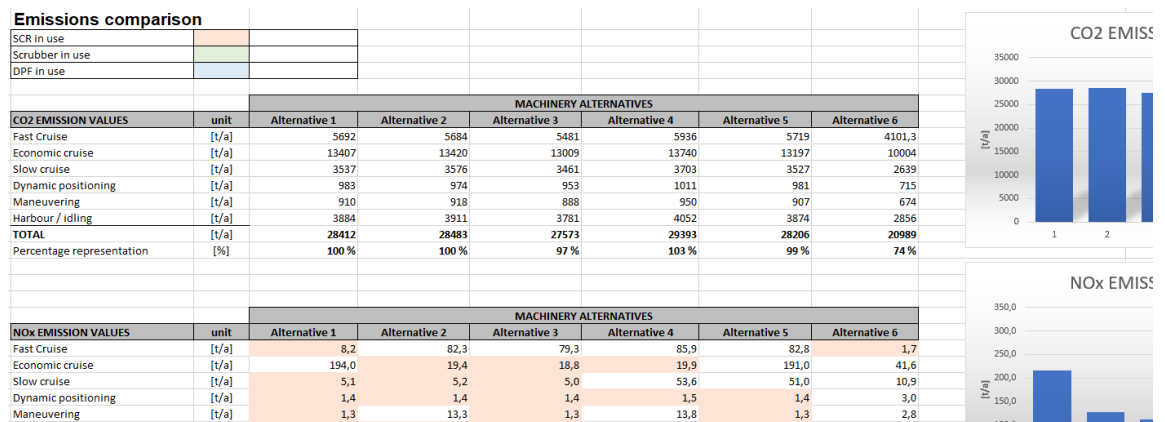
Kuva 21. Lisäaineiden diagrammivertailu.

Tämän lisäksi kaikesta kulutuksesta on tehty myös yhteisvertailu (kuva 23), joka auttaa hahmottamaan eri kulutusaineiden osuutta kokonaisuudesta.



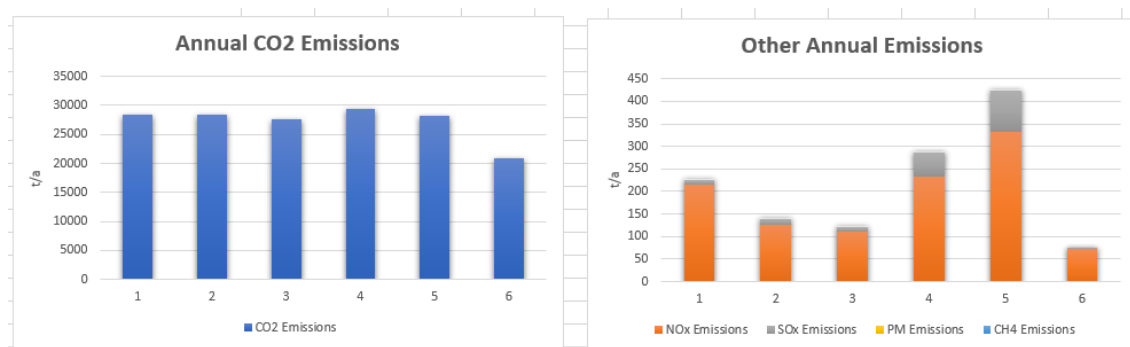
Kuva 22. Kulutuksen yhteisvertailu.

Vastaavanlaiset esitykset löytyvät myös eri pakokaasukomponenteista työkalun Emission comparison -välilehdeltä (kuva 24). Kyseisellä välilehdellä on lisäksi värjätty solu tietyllä värillä, jos kyseisessä operointimoodissa on käytössä tietty pakokaasunpuhdistusmenetelmä.



Kuva 23. Pakokaasupäästöjen erittely operointimodeittain.

Pakokaasupäästöistä on myös yhteenvetotaulukot kokonaisuuden hahmottamiseksi (kuva 25).



Kuva 24. Päästöjen yhteenveto.

7 Yhteenveto

Insinööriyössä käytiin läpi laivan koneiston tuottamia pakokaasuja, laivojen päästörajoituksia, laivapolttoaineita sekä pakokaasunpuhdistusmenetelmiä. Lisäksi kehitettiin Helsinki Shipyard Oy:n Excel-laskentatyökalua siten, että siihen lisättiin pakokaasupäästöjen laskentaan sekä pakokaasunpuhdistuslaitteistoihin liittyviä osioita.

Työssä saatiin koottua yhteen tällä hetkellä yleisimmin käytössä olevista pakokaasunpuhdistusmenetelmistä (SCR ja skrubberi) tietopaketti, jota voidaan hyödyntää muun muassa laitteistoratkaisujen suunnittelussa sekä käytössä. Alun perin suunnitelmana oli sisällyttää työhön myös laajemmin pienhiukkasten puhdistus, mutta nyt kyseinen osio jäi vähemmälle tarkastelulle pääasiassa laivakäyttöön soveltuvien laitteistojen puutteen vuoksi.

Telakan Excel-laskentatyökaluun kehitettyjä osioita hyödynnetään jatkossa laivan konseptivaiheen suunnittelussa. Niillä saadaan tuotettua lisätietoa vaihtoehtoihin koneistoratkaisuihin ja vaihtoehtoja voidaan näin arvioida paremmin kokonaisuuden kannalta. Laskentatyökaluun liittyy myös jatkokehitysmahdollisuuksia muun muassa pienhiukkasmäärien ja -puhdistusmenetelmien laskennan sekä dual fuel -moottoreiden metaanipäästöjen osalta.

Lähteet

- 1 Autojen pakokaasupäästöt. 2019. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/perustietoa_liikenteesta/autojen_pakokaasupaastot>. Luettu 20.9.2021.
- 2 Rychlik, Arkadiusz ja Jasiulewicz-Kaczmarek, Malgorzata. 2013. Diagnostics Systems as a Tool to Reduce and Monitor Gas Emissions from Combustion Engines. Puola: Poznan University of Technology.
- 3 Hiilidioksidipäästöt. 2021. Verkkoaineisto. Liikennefakta. <<https://liikennefakta.fi/fi/ymparisto/henkiloautot/hiilidioksidipaastot>>. Luettu 27.9.2021.
- 4 Overview of Greenhouse Gases. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Luettu 1.10.2021.
- 5 Vehicle NOx emissions: The Basics. 2017. Verkkoaineisto. The International Council on Clean Transportation. <<https://theicct.org/cards/stack/vehicle-nox-emissions-basics>>. Luettu 27.9.2021.
- 6 Pluim, Wessel; vd Valk, Kaj; Prinsen, Niels & Fontin, Wouter. 2017. Reducing NOx and SOx. Alankomaat: Rotterdam Mainport University.
- 7 Health and Environmental effects of Particulate Matter. Verkkoaineisto. United States Environmental Protection Agency. <<https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>>. Luettu 1.10.2021
- 8 Intovuori, Ville-Veikko. 2020. IMO:n MARPOL-yleissopimuksen Tier III NOx-päästörajoitukset. PowerPoint-esitys. Helsinki: Traficom.
- 9 Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. Verkkoaineisto. International Maritime Organization. <[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)>. Luettu 1.10.2021.
- 10 Sulphur oxides (SOx) and Particulate Matter (PM) – Regulation 14. Verkkoaineisto. International Maritime Organization. <[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)>. Luettu 1.10.2021.
- 11 Legislation. Verkkoaineisto. The North of England Protecting and Indemnity Association Limited. <<https://www.nepia.com/legislation/>>. Luettu 1.11.2021.

- 12 Changes in the Shipping Industry with Low Sulfur Surcharge. Verkkoaineisto. TranscoCargo. <<https://www.transcocargo.com.au/changes-in-the-shipping-industry-with-low-sulfur-surcharge/>>. Luettu 3.11.2021.
- 13 EURO VI Engines in Inland Waterway Transport Vessels. 2018. European Inland Barging Innovation Platform. Verkkoaineisto. <<https://eibip.eu/publication/euro-vi-engines-in-inland-waterway-transport-vessels/>>. Luettu 9.12.2021.
- 14 Marine fuels (Bunker fuels). Marquard & Bahls. Verkkoaineisto. <<https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-fuels-bunker-fuels.html>>. Luettu 3.11.2021.
- 15 Wärtsilä NOx Reducer (NOR). Wärtsilä. Verkkoaineisto. <<https://www.wartsila.com/marine/build/engines-and-generating-sets/nox-abatement/wartsila-nox-reducer-nor>>. Luettu 10.11.2021.
- 16 BlueTec Selective Catalyst Reduction. Blue Plus. Verkkoaineisto. <http://www.blueplus.com.hk/web/en/scr_system.html>. Luettu 10.11.2021.
- 17 Niemi, Seppo. 2018. Selective catalytic reduction SCR. University of Vaasa. Luentomoniste.
- 18 Environmental product guide. 2017. Verkkoaineisto. <<https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/egc/product-guide-o-env-environmental-solutions.pdf>>. Luettu 20.11.2021.
- 19 SOx Scrubbers. 2018. University of Vaasa. Luentomoniste.
- 20 Dongkyu Kim ja Changhee, Lee. 2019. SCR Performance Evaluations in Relation to Experimental Parameters in a Marine Generator Engine. Journal of Marine Science and Engineering 15.3.2019.
- 21 A proven process adapted to maritime transport. Solvair. Verkkoaineisto. <<https://www.solvairsolutions.com/en/solvair-marine>>. Luettu 20.11.2021.
- 22 Wall-Flow monoliths. Dieselnet. Verkkoaineisto. <https://dieselnet.com/tech/dpf_wall-flow.php>. Luettu 9.12.2021.
- 23 Diesel particulate filter DPF. 2018. University of Vaasa. Luentomoniste.
- 24 Diesel Particulate Filters for PM Control from Marine Engines. 2016. Manufacturers of Emission Controls Association. PowerPoint-esitys.

- 25 Hurskainen, Joonas. 2020. Euro VI-päästönormien soveltaminen expedition-risteilijään. Vaasan yliopisto.
- 26 Technology. Hug Engineering. Verkkoaineisto. <<https://hug-engineering.com/technologies/low-emissions/technology>>. Luettu 30.12.2021.
- 27 Zhongmin, Ma; Yuanyuan, Yang; Peiting, Sun; Hui, Xing; Shulin, Duan; Hongfei, Qu & Youngjiu, Zou. 2021. Analysis of Marine Diesel Engine Emission Characteristics of Different Power Ranges in China. Dalian Maritime University. Kiina.
- 28 Stenersen, Dag ja Thonstad, Ole. 2017. GHG and NOx emissions from gas fuelled engines. SINTEF Ocean AS. Norja.