

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulun koulutusohjelma / Merenkulkualan insinööri

Tuomas Ahola

LAIVALIIKENTEESTÄ AIHEUTUVAT ILMANSAASTEET JA NIIDEN PUHDISTAMINEN

Opinnäytetyö 2010

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulun koulutusohjelma

AHOLA, TUOMAS

Laivaliikenteestä aiheutuvat ilmansaasteet ja niiden puhdistaminen

Insinööri

64 sivua + 3 liitesivua

Työn ohjaaja

Lehtori, DI Risto Korhonen

Toimeksiantaja

Kymi Technologies

Lokakuu 2010

Avainsanat

ilmansaasteet, pakokaasut, MARPOL, rikki, typpi, pienhiukkaset, puhdistus

Opinnäytetyön kirjoitushetkellä merenkulkuala on uudistuksien edessä. Tiukentuvien ilmastopöytäkirjojen myötä myös laivaliikenteen ilmansaasteiden päästöjä kiristetään. Opinnäytetyön tavoitteena on koota kattava ja yleishyödyllinen selvitys maailman tämänhetkisistä päästörajoituksista, päästörajoitusalueista sekä teknisistä menetelmistä rajoitusten saavuttamiseksi. Työn kohderyhmäksi on ajateltu merenkulkualan insinööriopiskelijoita sekä merikapteeneita.

Työ on toteutukseltaan kirjallisuuskatsaus, joten tutkimusmenetelmät koostuivat olennaisen aineiston hankinnasta ja tulkinnasta. Työn alussa käsiteltävää ilmaaasteiden kemian osuutta varten hankittiin kirjallista materiaalia ympäristönsuojelun julkaisuista sekä Ilmatieteen laitoksen tiedotteista. Opinnäytetyössä tarkasteltujen puhdistusmenetelmien perustiedot on saatu alan julkaisuista sekä merenkulun opetusmateriaaleista. Vallitsevien ilmansaasterajoitusten ja rajoitusalueiden selvittämiseksi hyödynnettiin eri valtioiden ympäristövirastojen sähköisiä tiedotteita, pääasiassa web-sivustoja.

Päästörajoitusten nykyisiä trendejä sekä aikaisempaa kehityssuuntaa tarkastelemalla voidaan päätellä, että laivaliikenteen ilmansaasteiden puhdistustekniikkaan on tulossa väistämättömiä muutoksia. Lähitulevaisuudessa voimaan astuvat rikkipäästörajoitukset on mahdollista toteuttaa myös vähärikkisen polttoaineen avulla. Vähärikkisen polttoaineen pidempiaikainen käyttö on kuitenkin vallitsevilla polttoainehinnoilla epäedullista verrattuna savukaasujen puhdistuslaitteistosta aiheutuviin sijoituskustannuksiin. Rikki- ja typpipäästöjen lisäksi voidaan olettaa, että MARPOL asettaa aikanaan myös rajoituksia hiilidioksidille sekä pienhiukkaspäästöille.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Degree Program in Maritime Studies

AHOLA, TUOMAS

Air pollution caused by shipping and the affiliated cleaning methods

Bachelor's Thesis

65 pages + 3 pages of appendices

Supervisor

Risto Korhonen MS, Lecturer

Commissioned by

Kymi Technologies

October 2010

Keywords

emissions, exhausts, MARPOL, sulfur, nitrous oxides, particulates, cleaning

At the time of writing this bachelor's thesis, the maritime industry was facing a change. Along with the tightening climate agreements, the shipping industry also had to cut back on its emissions. The aim of this thesis was to compile a non-profit and comprehensive research on the world's current emission restrictions, emission control areas and the technical means to accomplish these limitations. This thesis was aimed at students in the maritime programme.

The research methods used in this thesis consisted mainly of acquiring the relevant material and its interpretation. The first part of the thesis covered the chemistry of ship based air pollutants and the necessary data was acquired from environmental publications and from the Finish Meteorological Institute. The basics of the cleaning methods covered in the thesis were gathered from the industry's publications and from the educational materials of the maritime programme. In defining the current emission restrictions and emission control areas, various governmental environment agencies were utilized, mainly by utilizing their web pages.

By examining the current trends and earlier progress of exhaust gas cleaning, it may be concluded that there will be inevitable changes in the cleaning methods of shipping. The sulfur emission limitations coming into effect in the near future may also be implemented using low sulfur fuel. Long-term use at current fuel prices, however, is unfavorable in comparison to the investment costs of an exhaust gas cleaning system. In addition to the sulfur and nitrous oxide emission restrictions, it is expected that MARPOL will in time set new restrictions for carbon dioxide and particulate matter.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KÄSITELUETTELO

1 JOHDANTO	10
1.1 Aiheen valinta ja työn tavoitteet	10
1.2 Aineiston hankinta ja käsittely	10
2 PÄÄSTÖJEN SYNTY	10
2.1 Propulsiokoneistot.....	11
2.1.1 Höyryturbiini.....	11
2.1.2 Dieselmoottorit.....	12
2.2 Jätteiden poltto	13
2.3 Suojakaasulaitteistot.....	14
3 PÄÄSTÖJEN ERITTELY	14
3.1 <i>NO_x</i> -päästöt eli typen oksidit	15
3.1.1 Dityppioksidi (<i>N₂O</i>)	16
3.1.2 Typpimonoksidi (<i>NO</i>).....	16
3.1.3 Typpidioksidi (<i>NO₂</i>).....	17
3.1.4 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi	18
3.2 <i>SO_x</i> -päästöt eli rikkioksidit	19
3.2.1 Rikkitrioksidi (<i>SO₃</i>).....	19
3.2.2 Rikkidioksidi (<i>SO₂</i>)	19
3.2.3 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi	19
3.3 Hiilidioksidi (<i>CO₂</i>)	20
3.3.1 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi	21
3.4 Hiilimonoksidi (<i>CO</i>).....	21
3.5 Pienhiukkaset	22
3.5.1 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi	23
3.6 Hiilivedyt (THC).....	24
3.6.1 Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH).....	24
3.6.2 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi	24
4 PUHDISTUSMENETELMÄT	24
4.1 Moottoritekniset menetelmät	25

4.1.1 Miller-prosessi	25
4.1.2 Polttoaineventtiilit	26
4.1.3 Suora vesiruiskutus (DWI).....	28
4.1.4 Jatkuva vedenruiskutus (M. A. Turbo/Engine Ltd - CWI)	29
4.1.5 Syöttöilman kostutus (Wärtsilä – CASS/Wetpac H)	29
4.1.6 Kostean ilman moottori (MAN B&W – HAM).....	30
4.1.7 Dieselmoottorin höyryinjektio (STID).....	31
4.1.8 Polttoaineruiskutuksen ajoitus (VIT)	32
4.1.9 Muita menetelmiä	34
4.2 Pakokaasujen käsittely	35
4.2.1 Pakokaasun takaisinkierrätys (EGR)	35
4.2.2 Katalysaattori (SCR).....	36
4.2.3 Rikkipesuri	38
4.2.3.1 Merivesipesu	39
4.2.3.2 Makeavesipesu	40
4.2.3.3 Kuivapesu (DryEGCS)	42
4.2.4 Yhdistelmäpesuri (CSNOx)	43
4.3 Muita mahdollisia tekniikoita	45
4.3.1 Ydinkäyttö.....	45
4.3.2 Polttokennot	46
4.3.2.1 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)	46
4.3.2.2 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC).....	48
4.3.3 Stena E-MAXair	49
5 PÄÄSTÖMÄÄRÄYKSET JA RAJOITUKSET	50
5.1 Merellisen ympäristön suojelukomitea (MEPC).....	50
5.2 MARPOL liite VI.....	51
5.3 Päästöjen valvonta-alueet (ECA)	53
5.3.1 Rikin oksidipäästöjen päästöjen valvonta-alue (SECA)	53
5.3.2 Typen oksidipäästöjen valvonta-alue (NECA)	54
5.4 Direktiivi 2005/33/EC.....	55
5.5 Helsingin sopimus.....	55
5.6 Kalifornia	55
5.7 Antarktis.....	56
6 YHTEENVETO	Error! Bookmark not defined.

LÄHTEET.....	59
--------------	----

LIITTEET

Liite 1. Pykälä 21 i

Liite 2. Pykälä 21 c

Liite 3. IMO NO_x-päästötasot

KÄSITELUETTELO

ACERT	Caterpillarin kehittämä ratkaisu dieselmoottoreiden päästöjen alentamiseen (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology)
ASOC	Etelämantereen ja Eteläisen jäämeren suojeliitto (Antarctic and Southern Ocean Coalition)
CASS	Ahtoilman kostutusjärjestelmä (Combustion Air Saturation System)
CCS	Tekniikka jolla hiilidioksidi kerätään talteen ja varastoidaan (Carbon Capture and Storage)
CSNO _x	Yhteispuhdistuslaitos hiilidioksidille, rikille, typenoksidoille sekä hiukkaspäästöille (CO_2, S, NO_x)
CWI	Jatkuva vedenruiskutus (Continuous Water Injection)
DF	Kahta polttoainetta hyödyntävä moottori (Dual Fuel)
DryEGCS	Kuiva-aineella toimiva puhdistuslaitos rikille ja typenoksidoille (Dry Exhaust Gas Cleaning System)
DWI	Veden suoraruiskutus palotilaan (Direct Water Injection)
ECA	Päästöjen valvonta-alue (Emission Control Area)
EEDI	Uudisrakennuksien taloudellisen suunnittelun ohjeistus (Energy Efficiency Design Index)
EEOI	Varustamoille suunnattu aluksien taloudellisen operoinnin työkalu (Energy Efficiency Operational Indicator)
EGR	Pakokaasun takaisinkierrätys (Exhaust Gas Recirculation)
FWE	Vesiemulsiomenetelmä (Fuel Water Emulsion)
HAM	Kostean ilman moottori (Humid Air Motor)
HELCOM	Itämeren suojelukomissio (Helsinki Commission)
HFO	Raskasöljy (Heavy Fuel Oil)

IES' CO2 Reduction Technology

	Tekniikka jolla hiilidioksidi pilkotaan takaisin alkumolekyyleihin (Integrated Environmental Services)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
LFO	Kevyt polttoöljyöljy (Light Fuel Oil)
MARPOL	Kansainvälinen sopimus aluksista aiheutuvien päästöjen ehkäisemiseksi (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MCFC	Polttokennotyyppi jonka elektrolyytti koostuu nestemäisestä sulakarbonaatista (Molten Core Fuel Cell)
MEPC	IMO:n meriympäristön suojelukomitea (Marine Environment Protection Committee)
NECA	Typenoksidipäästöjen kontrollialue
NO _x	Typenoksidit (Nitrous Oxides)
PAH	Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)
PM _x	Hiukkasten kokoluokka jossa x on mikrometreinä hiukkasen suurin koko (Particulate Matter)
PPM	Miljoonasosa (Parts Per Million)
SCR	Katalyyttinen puhdistus (Selective Catalytic Reaction)
SECA	Rikkipäästöjen kontrollialue (Sulphur Emission Control area)
SEEMP	Aluksen käyttöhenkilökunnalle suunnattu käytön optimoinnin työkalu (Ship Energy Efficiency Management Plan)
SFWI	Kerrostettu vesi-polttoaineruikutus (Stratified Fuel Water Injection)

SOFC	Polttokennotyyppi jonka elektrolyytti on oksidi-ioneja johtavaa kiinteää materiaalia (Solid Oxide Fuel Cell)
SO _x	Rikin oksidit (Sulphur oxides)
STID	Dieselmoottorin höyryinjektio (Steam Injected Diesel Engine)
TDW	Kuollutpaino (Tonnage Dead Weight)
THC	Hiilivedyt (Total Hydrocarbon)
ULFELS	CSNO _x -puhdistuslaitteiston pääkomponentti (Ultra-Low Frequency Electrolysis System)
VIT	Polttoaineruiskutuksen ajoitus (Variable Injection Timing)

1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa ympäristöasiat vaikuttavat yhä suuremmalla painolla laivaliikenteen toimintaan ja tulevat merenkulun ammattilaiset valmistuvat keskelle murrostilannetta, jossa vanha sekä uusi tekniikka toimivat päällekkäin. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on edistää tietämystä yleisistä päästöihin liittyvistä asioista ja sitä myöten vahvistaa yleiskäsitystä säädöksistä ja säännöistä.

1.1 Aiheen valinta ja työn tavoitteet

Tämän työn kirjoittamisen aikaan merenkulun ajankohtaisimpia puheenaiheita ovat ympäristökysymykset sekä niihin liittyvät rajoitukset. Laitevalmistajat tuovat jatkuvasti markkinoille uusia innovaatioita, joilla päästään alhaisempiin päästörajoihin sekä alhaisempaan polttoaineen kulutukseen. Tietoa päästörajoituksista, päästöistä sekä laitteistoista on runsaasti saatavilla, mutta se on hajallaan eri julkaisuissa.

Opinnäytetyössä keskitytään laivaliikenteen tuottamiin ilmansaasteisiin ja tavoitteena on koota kattava selvitys tämän hetken pakokaasupäästöistä. Työssä selvitetään pakokaasujen koostumusta, niistä aiheutuvia ympäristöhaittoja sekä olemassa olevien ja vielä osittain kehitteillä olevien puhdistuslaitteistojen toimintaa. Työn lopussa tarkastellaan teollisuuden päästöjen kehitystä, ja sen valossa pyritään ennustamaan päästörajoi-
toitusten kehitystä merenkulun osalta.

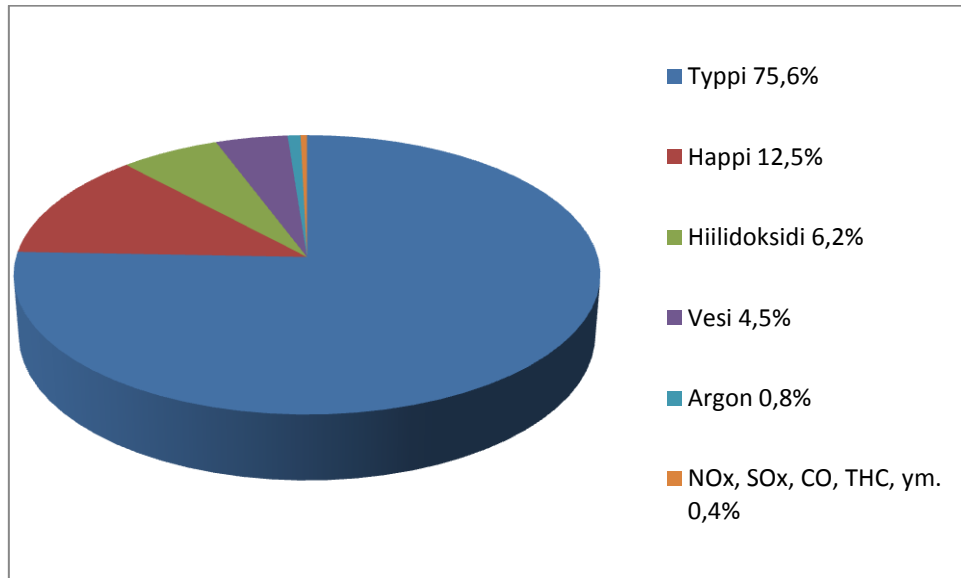
1.2 Aineiston hankinta ja käsittely

Opinnäytetyössä käytetty tieto on jo olemassa, mutta hajallaan. Tarvittavaa tietoa on kerätty muun muassa aihetta sivuavista opinnäytetöistä, ympäristöjulkaisuista sekä laitevalmistajien tuote-esittelyistä.

2 PÄÄSTÖJEN SYNTY

Riippuen aluksen tyypistä pääkoneen lisäksi päästöjä syntyy satama- ja hätägeneraattoreista, höyrykattiloista, suojakaasulaitteista sekä jätteenpolttolaitoksista. Tässä työssä tarkastellaan pääasiassa dieselkäyttöisiä aluksia ja niistä aiheutuvia ilmansaasteita.

Laivaliikenteen ilmansaasteet syntyvät lähes täysin fossiilisten polttoaineiden palamisen yhteydessä (kuva 1), joskin pieni osa koostuu myös voiteluöljyjen palamisesta.



Kuva 1. Suurikokoisen dieselikäyttöisen laivan pakokaasupäästöjen koostumus.

(Hellén 2003, 22)

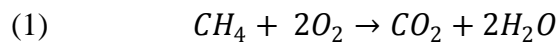
2.1 Propulsiokoneistot

Propulsiokoneistolla tarkoitetaan tässä työssä mitä tahansa laitteistoa, joka polttoainetta hyväksi käyttäen tuottaa laivan liikkumiseen tarvittavan energian. Nykypäivän yleisin laivakoneistotyyppi on joko hidaskäyntinen tai keskinopea dieselmoottori. Turbiinikäyttöiset laivat ovat lähes marginaaliryhmässä korkean polttoaineenkulutuksensa vuoksi. (Häkkinen 1993, 3)

2.1.1 Höyryturbiini

Höyryturbiinikäyttöisiä aluksia liikkuu nykyään merillä enää verrattain vähän, sillä alusten polttoainetalous on nykymittapuulla laskettuna paljon huonompi kuin dieselmoottoreiden (taulukko 1). Laivojen höyryturbiinit toimivat vesiputkikattiloiden avulla, joiden polttoaineena käytetään yleensä raskasta polttoöljyä tai joissakin kaasutankkereissa lastista höyrystyvää (boil-off) maakaasua (Häkkinen 1993, 213).

Käytettäessä polttoaineena maakaasua muodostuu palamisesta vähemmän ilmansaasteita kuin perinteisillä polttoaineilla. Maakaasun nesteytyksen yhteydessä kaikki rikki poistuu, minkä ansiosta myös pakokaasujen rikkioksidipitoisuudet vähenevät. Maakaasu koostuu pääasiassa metaanista (n. 98 %) ja sen palamisen (1) yhteydessä syntyy typen oksideja, vesihöyryä, hiilidioksidia sekä jonkin verran palamattomia hiilivetyjä. (Levander 2008, 47; Raiko, Kurki-Suonio & Saastamoinen 1995, 280; Hämälä, Laine & Vesa 1992, 99).



Taulukko 1. 15 000 TDW:n yksipotkurisen kuivarahtialuksen propulsiokoneistojen vertailua. (Häkkinen 1993, 2)

Koneistotyyppi	Voimansiirto	Kulutus	Hinta
Hidask. dieselm.	Suora	100	100
1 Keskin. dieselm.	Alennusvaihde	103	75
2 Keskin. dieselm.	Alennusvaihde	105	78
2 Keskin. dieselm.	Sähköinen	112	83
Höyryturbiini	Alennusvaihde	145	86
Kaasuturbiini	Alennusvaihde	137	80
Kaasuturbiini	Sähköinen	142	85
Yhdist. kaasu- ja höyryturb.	Alennusvaihde	102	93

2.1.2 Dieselmoottorit

Dieselmoottorit jakautuvat hidaskäyntisiin, keskinopeisiin ja nopeisiin moottoreihin. Niitä käytetään niin laivan pääkoneina kuin apu- ja hätäkoneinakin. Luokitus määräytyy moottorin kierrosluvun mukaan seuraavasti:

Hidaskäyntiset (lähes poikkeuksetta 2-tahtisia): 60 - 300 rpm

Keskinopeat (4-tahtisia): 300 - 1200 rpm

Nopeakäyntiset (4-tahtisia): 1500 - 2200 rpm

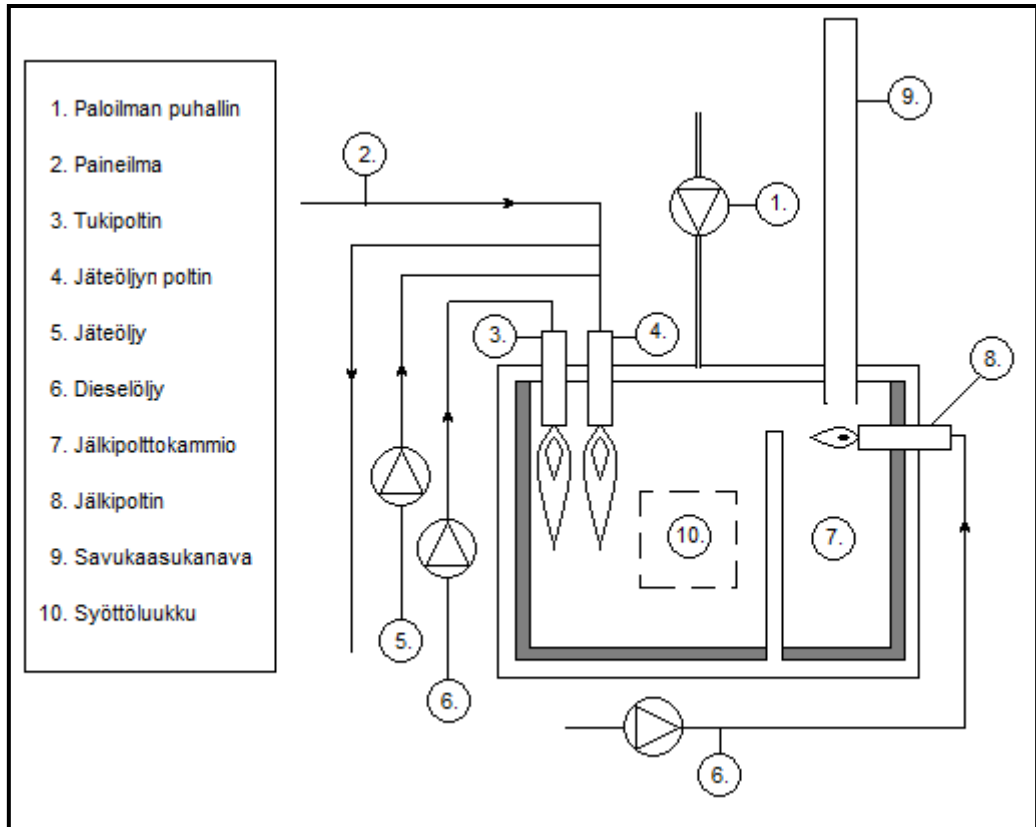
Laivadieselien polttoaine on pääasiassa raskasta polttoöljyä, mutta viimeaikaisen raakaöljyn hinnannousun sekä yleisen ympäristöpainotteisemman ajattelutavan lisääntyminen on tuonut markkinoille uusia polttoaineita. Näistä polttoaineista uusimpia ovat biopolttoaineet, kuten rapsi-, kookos- ja palmuöljy sekä biodiesel. (Haga 2006, 61)

Uusiutuvien polttoaineiden myötä on kuitenkin noussut keskustelu biopolttoaineiden raaka-ainekasvatuksen eettisyydestä, sillä polttoainetta varten käytetty viljelytila on yleensä pois ruoan kasvatuksesta. Tätä ongelmaa vastaan ollaan kehittämässä niin kutsuttuja toisen sukupolven biodieseleitä, jotka on valmistettu joko syömäkelvottomasta bioaineesta tai elintarvikkeiden valmistusprosessien sivutuotteista. (Stenger 2009, 60–62)

2.2 Jätteiden poltto

Osassa rahtialuksista käytetään vielä nykyään jätteidenpolttolaitosta jätteiden hävittämiseen (kuva 2). Laitosten käyttöä kuitenkin rajoittavat muun muassa MARPOL 73/78-yleissopimuksen määräykset sekä Suomen laki (LIITE 1).

Rajoitusten lisäksi jätteenpolttouunien käyttöä rajoittaa niiden epätaloudellisuus (öljypolttimet) sekä alhaisesta polttolämpötilasta johtuvat savukaasujen likaavat ja syövyttävät ominaisuudet (Häkkinen 1993, 230). MARPOL-liitteen VI kohta 16 määrittelee tarkemmin jätteenpolttolaitoksen vaatimukset.



Kuva 2. Laivakäytössä tyypillinen jätteenpolttolaitos kiinteille ja nestemäisille jätteille. (Häkkinen 1993, 230)

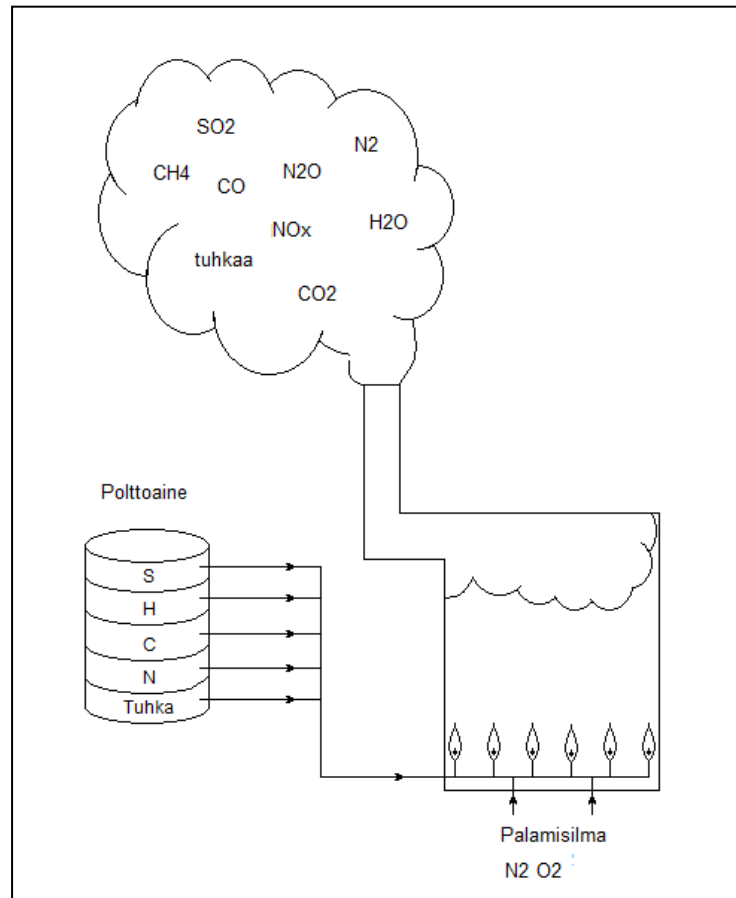
2.3 Suojakaasulaitteistot

Suojakaasulaitteistoja käytetään aluksissa, jotka kuljettavat räjähdysherkkiä kaasuja synnyttäviä lasteja, kuten raakaöljyä, kaasua ja joitakin kemikaaleja. Suojakaasulaitteiston toiminta perustuu suojattavan tankin kaasujen happipitoisuuden alentamiseen. Tankkiin ajettava kaasu synnytetään öljypolttimien avulla tai hyödyntämällä laivalla jo syntyneitä pakokaasuja. Kaasun happipitoisuus lasketaan polttamalla alle viiteen prosenttiin ja siitä pestään epäpuhtaudet, kuten rikki ja noki. Lopuksi suojakaasu jäähdytetään ja ohjataan puhaltimilla suojattavaan tankkiin (Häkkinen 1993, 211; IMO Inert Gas Systems 1990, 9)

3 PÄÄSTÖJEN ERITTELY

Laivaliikenteen ilmansaasteet, kuten muutkin saasteet, koostuvat eri yhdisteistä, joilla on monimuotoisia vaikutuksia ympäristöömme sekä terveytemme (kuva 3). Seuraa-

vassa osiossa käydään läpi tämän hetken ongelmallisimpia päästöjä, myrkkyyhdisteiden syntyä sekä niiden vaikutuksia.

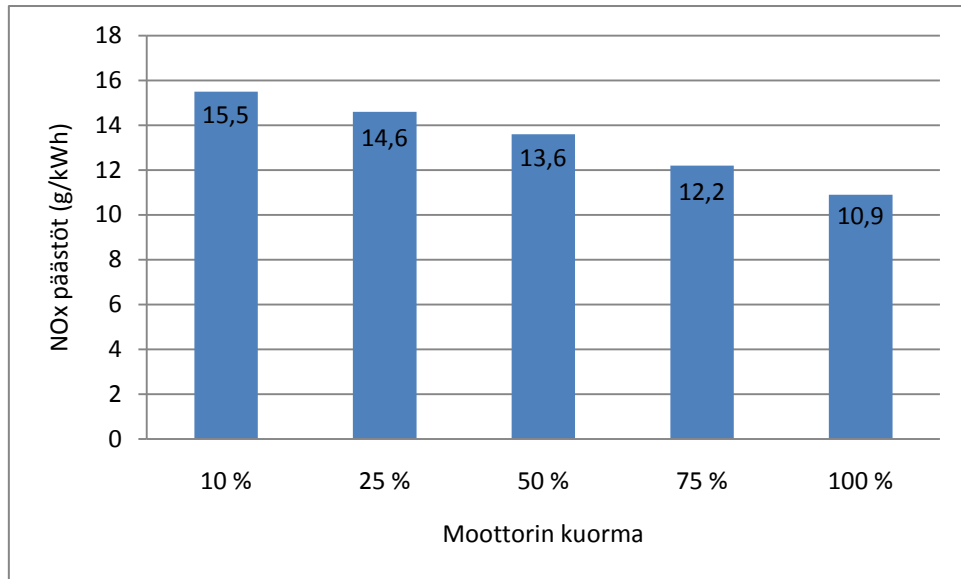


Kuva 3. Polttoaineen sisältämät yhdisteet reagoivat palamisilman kanssa ja siirtyvät savukaasuihin. Epätäydellisen palamisen tuloksena syntyy muun muassa häkää.

(Laukkanen 1998, 67)

3.1 NO_x -päästöt eli typen oksidit

Typpioksidit ovat typen ja hapen muodostamia yhdisteitä, joista yleisimpiä ovat di-typpioksidit (N_2O), typpimonoksidi (NO) sekä typpidioksidit (NO_2). Typen oksideja syntyy palamisreaktiossa, jossa osa polttoaineen sekä palamisilman sisältämästä tyypistä hapettuu. Typen oksidien syntyyn vaikuttaa pääasiassa palamisreaktion lämpötila sekä ilmaylimäärä, mutta myös moottorin kuorma (kuva 4). (Laukkanen 1998, 64)



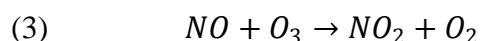
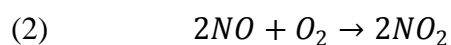
Kuva 4. Jarrutetun moottorin oletuspäästöarvot. (Wright 2000, 127)

3.1.1 Dityppioksidi (N_2O)

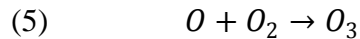
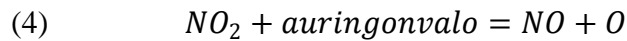
Dityppioksidi (typpioksiduuli, ilokaasu) on varsin pitkäikäinen yhdiste. Sen elinikä ilmakehässä voi olla jopa toista sataa vuotta ja se on satoja kertoja voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. Dityppioksidi ei ole happamoittava tai myrkyllinen yhdiste (eikä näin ollen typenoksidi), mutta ajan saatossa se voi siirtyä stratosfääriin jossa se reagoi otsonin kanssa ja ohentaa otsonikerrosta. (Laukkanen 1998, 26, 51; Seppänen 1991, 142)

3.1.2 Typpimonoksidi (NO)

Typpimonoksidi on pääasiallinen palamisprosessissa vapautuva typenoksidi. Typpimonoksidi muuntuu ilmakehään päästyään typpidioksidiksi joko reagoimalla hapen (2) tai otsonin kanssa (3).



Reaktiossa 3 syntynyt typpidioksidi hajoaa auringon valon vaikutuksesta typpimonoksidiksi sekä vapaaksi happiatomiksi (4) ja vapaa happiatomi pariutuu muodostaen otsonimolekyylin (5). (Ilmatieteen laitos a)

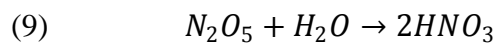
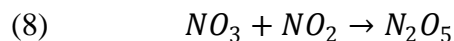
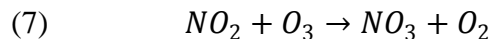
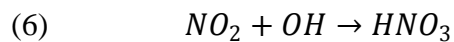


Yläilmakehässä otsoni vaimentaa auringon UV-säteiden haitallista voimaa mutta alailmakehässä se on myrkyllinen kaasu, joka aiheuttaa kasvillisuustuhoja sekä hengitysteiden ja silmien ärsytystä ihmisille. (Seppänen 1991, 131–134)

3.1.3 Typpidioksidi (NO_2)

Kuten reaktioista 2 ja 3 voidaan havaita, typpidioksidia syntyy typpimonoksidin reagoissa happiyhdisteiden kanssa. Pieni osa typpidioksidista syntyy palamisreaktion yhteydessä polttoaineen typen kanssa, mutta pääsiallisesti se muodostuu edellä mainittujen reaktioiden yhteydessä. Typpidioksidi aiheuttaa terveyshaittoja sekä kasvillisuustuhoja, mutta myös happosateita hapettuessaan ilmakehässä (Ilmanlaatuportaali 1.4).

Typpidioksidi hapettuu typpihapoksi päivällä ja yöllä eri reaktioilla. Päiväsaikaan typpidioksidi reagoi hydroksyylin kanssa (6) ja yöllä ilman otsonin sekä veden kanssa (7–9). Yöaikaan tapahtuva reaktio on mahdollista vain, koska NO_3 hajoaa auringon vaikutuksesta nopeasti. (Kulmala, Hienola, Hämeri, Pirjola & Vesala. 2008; 65, 93)



Reaktiossa muodostunut typpihappo hapettuu sadepisaroihin tai kosteille pinnoille. Voimakkaana happona se aiheuttaa muun muassa kalkkikivestä valmistetuille rakennusmateriaaleille korroosiota. Kyseistä korroosiota on nähtävissä jo muun muassa Kreikan Akropolis-kukkulan rakennuksissa. Happamat sateet aiheuttavat lisäksi haittaa puille ja kasveille, kun ravinteet huuhtoutuvat niiden vaikutuksesta syvemmälle

maahan. Joissakin tapauksissa happamat sateet ovat johtaneet myös vesistöjen ja pohjavesien pilaantumiseen (Laukkanen 1998, 60–61).

3.1.4 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi

Kuten otsikon 3.1 alussa mainittiin, typenoksidien määrä on riippuvainen niin palamislämpötilasta, moottorin kuormituksesta kuin polttoaineestakin. Päästöjen rajoittamista varten on kehitetty useita eri menetelmiä, joista suurin osa keskittyy lämpötilan alentamiseen palotilassa. Näitä ovat muun muassa seuraavat:

- FWE (Fuel Water Emulsion - vesiemulsiomenetelmä)
- EGR (Exhaust Gas Recirculation - pakokaasun takaisinkierätyk)
- DWI (Direct Water Injection - veden suoraruiskutus palotilaan)
- SFWI (Stratified Fuel Water Injection - kerrostettu vesi-polttoaine ruiskutus)
- Ahtoilman jäähditys ja kostutus
 - CWI (Continuous Water Injection – jatkuva vedenruiskutus)
 - HAM (Humid Air Motor)
 - CASS (Combustion Air Saturation System)
- STID (Steam Injected Diesel Engine - dieselmoottorin höyryinjektio)
- Millerin prosessi
- Polttoainesuuttimen malli

Muita keinoja NO_x- ja muiden päästöjen alentamiseen ovat muun muassa

- SCR (Selective Catalytic Reaction – katalyyttinen puhdistus)
- Common Rail (yhteispaineruiskutus)
- ACERT (Advanced Combustion Emissions Reduction Technology)

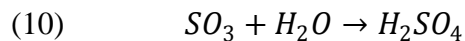
Lisäksi polttoainevalinnoilla voidaan vaikuttaa huomattavasti eri päästöjen syntyyn. Kaikki edellä mainitut menetelmät käsitellään työn myöhemmässä vaiheessa yksityiskohtaisemmin.

3.2 SO_x -päästöt eli rikkioksidit

Maakaasua lukuun ottamatta kaikki fossiiliset polttoaineet sisältävät rikkiä. Toisin kuin typpipäästöt, jotka aiheutuvat osittain palamisilman sisältämän typen reagoiessa hapen kanssa, muodostuvat rikkioksidit täysin polttoaineen sisältämästä rikistä. Palamisprosessissa syntyy rikkidioksidia sekä rikkitrioksidia. (Hämälä ym. 1992, 39)

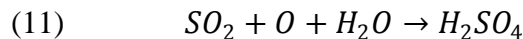
3.2.1 Rikkitrioksidi (SO_3)

Rikkitrioksidia syntyy palamisprosessin aikana vähän, verrattuna rikkidioksidiin. Rikkitrioksidia syntyy korkean palamislämpötilan seurauksena ja se reagoi helposti veden kanssa rikkihapoksi (10). (Hämälä ym. 1992, 100).



3.2.2 Rikkidioksidi (SO_2)

Rikkidioksidi hapettuu ilmakehässä nopeasti rikkitrioksidiksi (11) ja on näin ollen sen kanssa samanarvoinen ympäristömyrkky (Hämälä 1992, 17). Muodostunut rikkihappo voi olla kaasumaisessa muodossa jo savukaasuissa. Savukaasujen jäähtyessä rikkihappo saattaa alittaa kastepisterajan ja tiivistyä nestemäiseksi rikkihapoksi. Nestemäinen rikkihappo puolestaan aiheuttaa korroosiota muun muassa pakokaasukattiloissa sekä korsteenin putkissa. (Wright 2000, 41)



Rikin oksidit aiheuttavat hengitysteiden sairauksia ja muodostavat ilmakehässä happamia laskeumia. (Wright 2000, 69)

3.2.3 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi

Rikkipäästöt ovat olleet laivaliikenteessä jo pitkän aikaa ongelmallinen ilmansaaste. Muun muassa maavoimalaitoksissa menetelmät rikin poistamiseksi savukaasuista ovat

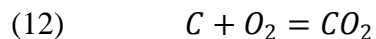
olleet olemassa jo pidemmän aikaa, mutta installaatiot ovat suuria ja vaativat paljon raaka-aineita toimiakseen.

Viime aikoina ympäristökysymykset ovat olleet kuitenkin enemmän esillä ja IMO:n asettamat vaatimukset laivojen rikkipäästöille ovat ajaneet valmistajat kehittämään uusia tekniikoita päästöjen rajoittamiseksi. Alla on lueteltu muutamia tällä hetkellä kehitettyjä ja vielä kehitteillä olevia ratkaisuja.

- Maasähkön käyttö satamissa
- Rikkipesurit
 - Märkäpesu (CSNOx)
 - Kuivapesu (DryEGCS)

3.3 Hiilidioksidi (CO_2)

Hiilidioksidi on hajuton ja väritön kaasu, jota syntyy polttoaineen sisältämän hiilen palaessa täydellisesti (12). Hiilidioksidi on merkittävä kasvihuonekaasu, sillä se kykenee muita kasvihuonekaasuja tehokkaammin absorboimaan maasta heijastuvaa auringon lämpösäteilyä. Absorboitu säteily puolestaan lämmittää ilmastoa.



Ihminen on omalla toiminnallaan edesauttanut kasvihuoneilmiön kiihtymistä teollistumisen ja hakkuiden myötä. Sen johdosta ilmakehän hiilidioksidimäärä on noussut 0,028 %:sta noin 0,038 %:iin (Ilmatieteen laitos b). Vuonna 2007 maailman laivaliikenteen CO_2 -päästöt olivat noin 870 miljoonaa tonnia. (Laukkanen 1998, 16–23; Woodyard 2002, 7)

Hiilidioksidista ei ole suoranaista haittaa ihmisille tai ympäristölle. Ilmaston lämpenemisen vaikutukset ovat kuitenkin vaikeasti ennustettavissa, ja jo nyt voidaan havaita sen aiheuttamia muutoksia, kuten jäätiköiden sulamista ja merenpinnan nousua. (Laukkanen 1998, 33)

3.3.1 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi

Hiilidioksidin kemialliset ominaisuudet tekevät sen puhdistamisesta ongelmallista. Siinä missä typen ja rikin oksidit voidaan kemiallisesti muuttaa toiseen, vaarattomampaan olomuotoon, ovat hiilidioksidin kohdalla ongelmana vahvat molekkyylisidokset. Tällä hetkellä varteenotettavimpia teknisiä kehityskohteita hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseksi ovat

- CSNO_x (Yhdistelmäpesuri)
- CCS (Carbon Capture and Storage)
- IES' CO₂ Reduction Technology

Lisäksi CO₂-päästöjä voidaan välillisesti rajoittaa parantamalla reittisuunnittelua sekä alusten hydrodynaamisia ominaisuuksia. IMO:n kehitteillä olevassa kasvihuonepäästösopimuksessa hiilidioksidin määrän alentamiseksi on kehitetty eri järjestelmiä, joilla päästöjä voitaisiin alentaa. Viimeisimpiä ehdotuksia ovat alusten päästökauppa, bunkeröljyn ympäristövero sekä uudisrakennuksille tarkoitettu suositus EEDI (Energy Efficiency Design Index). Muihin kehitteillä oleviin suosituksiin kuuluvat varustamoille suunnattu aluksien taloudellisen operoinnin työkalu EEOI (Energy Efficiency Operational Indicator), jolla laivatyyppin mukaan saadaan laskettua CO₂-päästöt per kuljetustonni, sekä aluksen käyttöhenkilökunnalle suunnattu SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan). (Marine Propulsion 2-3/20010, 16)

Edellä esitettyjen tekniikoiden lisäksi CO₂-päästöjä voidaan alentaa ottamalla käyttöön biologisia polttoaineita, koska näihin sitoutunutta hiilidioksidia voidaan pitää neutraalina, luonnon normaalissa kierrossa olevana aineena (Stenger 2009, 60–62).

3.4 Hiilimonoksidi (CO)

Epätäydellisen palamisen seurauksena moottoreiden palotilassa syntyy pieni määrä hiilimonoksidia eli häkää. Häkä on hajuton, väritön ja mauton kaasu, joten sen havaitseminen ilman apuvälineitä on mahdotonta. Laivojen pakokaasuissa on vain muutamia prosentin murto-osia häkää, joten sen vaikutukset jäävät ympäristössä vähäisiksi. Häkä on vaarallinen yhdiste, sillä se syrjäyttää hapen veren hemoglobiinissa. 50 ppm ar-

voissa (0,005 %) ihmisen hengitys kiihtyy ja motoriset toiminnot häiriintyvät. Tilavuusprosentin kasvaessa seuraavat päänsärky ja väsymys sekä yli 750 ppm arvoilla lopulta tajunnan menetys ja kuolema. (Wright 2000, 70)

Hiilimonoksidipitoisuuksia voidaan laskea pitämällä palotilan ilmaylimäärä tarpeeksi korkealla. Palamislämpötilan voidaan olettaa olevan liian alhainen, mikäli pakokaasuissa esiintyy huomattavasti nokea ja palamattomia kiintoaineita. (Hämälä ym. 1992, 101)

3.5 Pienhiukkaset

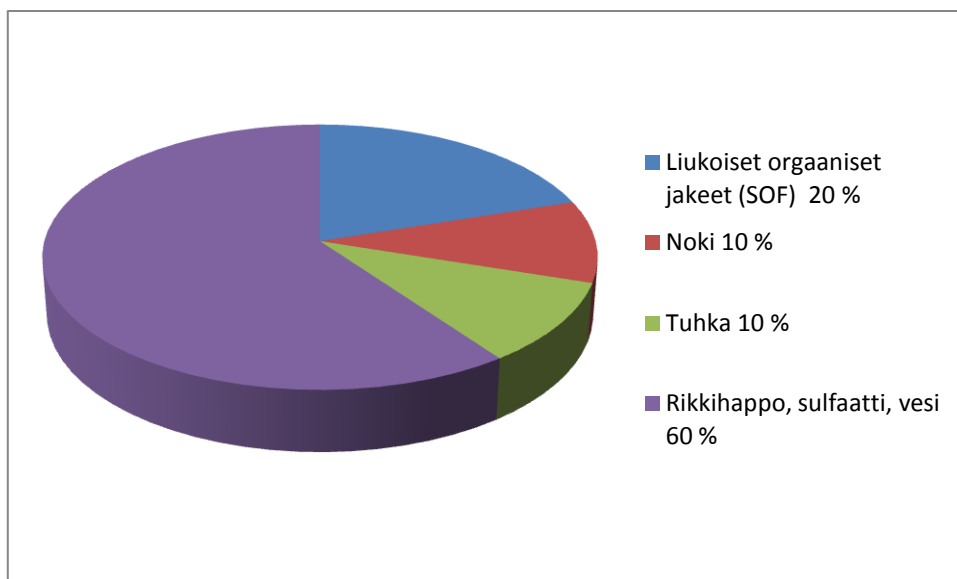
Dieselmootoreille ominainen musta savu on peräisin savukaasujen sisältämistä pienhiukkasista. Nämä hiukkaset ovat pääasiassa hiilikertymiä, joihin palotilan lämmön muutoksen seurauksena kiinnittyy eri ainesosia muodostaen 0,01-10 μm kokoisia partikkeleita. (Raiko ym. 1995, 531; Ohström 1998, 33)

Pienhiukkaset voivat olla nestemäisessä tai kiinteässä olomuodossa, mutta yhteinen tekijä niille on niiden pieni koko. Haitalliset pienhiukkaset luokitellaan nimellishalkaisijansa mukaan seuraavasti:

Taulukko 2. Pienhiukkasten luokitus koon mukaan. (Wright 2000, 73)

PM_{10}	Hiukkaset joiden nimellishalkaisija on alle 10 μm . Suodatus-teknisistä syistä tämän hiukkasryhmän suurimmat partikkelit voivat olla enintään 30 μm .
$PM_{2.5}$	Kuten edellä, mutta nimellishalkaisija 2.5 μm ja suurin sallittu koko 7 μm

Polttoaineen koostumus, kuten tuhka- ja rikkipitoisuudet, vaikuttavat pienhiukkasten syntyyn, mutta myös sen epätäydellinen palaminen synnyttää haitallisia jakeita. Kuvasta 5 voidaan nähdä tyypillisen keskinopean dieselmootorin pienhiukkasten koostumus.



Kuva 5. Pienhiukkasten koostumus käytettäessä korkearikkistä polttoainetta. (Hellèn 2007 a, 33)

Haitalliset terveysvaikutukset johtuvat hiukkasten pienestä koosta, sillä pienimmät näistä hiukkasista saattavat tunkeutua syvälle keuhkoihin ja joskus jopa verenkiertoon asti. Pienhiukkasiin sitoutuneet liukoiset orgaaniset jakeet ovat pääasiassa hiilivetyjä tai PAH-yhdisteitä, joilla voi olla syöpää aiheuttavia vaikutuksia elimistössä.

3.5.1 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi

Monilla aiemmin mainituilla puhdistustekniikoilla on suora vaikutus pakokaasujen hiukkaspitoisuuksiin. Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa vuonna 1998 tehdyssä tutkimustyössä hiukkaspäästöjä saatiin pienennettyä muun muassa vesiemulsiotekniikalla. (Huhtinen, Hokkanen, Arvila, Conessen, Käyhty & Muuri, 1998)

Pienhiukkasten puhdistus suurten dieselmootoreiden pakokaasuista on kuitenkin ongelmallista nykyisillä laitteilla. Sähkösuodattimet ovat epäkäytännöllisiä suuren tilantarpeensa vuoksi ja katalysaattorit tukkeutuvat sekä likaantuvat helposti, mikäli pakokaasuissa on runsaasti rikkiä ja tuhkaa. Jäljelle jäävistä puhdistuskeinoista varteenotettavimpia ovat yhteispaineruiskutuksen (common rail) käyttöönotto sekä polttoaineen ja voiteluaineen rikki- ja tuhkapitoisuuksien alentaminen. (Hellèn 2007 a, 32–33)

3.6 Hiilivedyt (THC)

Edellä mainittujen yhdisteiden lisäksi pieni osa laivaliikenteen päästöistä muodostuu hiilivedyistä. Yhdisteitä voi vapautua ilmaan pakokaasujen lisäksi liuottimista, maaleista tai polttoaineista lastauksen ja säilytyksen aikana. Hiilivetyjen tutkimus on edelleen käynnissä, mutta jo nyt tiedetään tiettyjen yhdisteiden, kuten bentseenin (C_6H_6), olevan syöpää aiheuttava karsinogeeni (Wright 2000, 71).

Ympäristövaikuttavia hiilivetyjä on muun muassa metaani (CH_4), jota vapautuu epätydellisessä palamisessa sekä maakaasun höyrystyessä. Metaani on moninkertaisesti voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi, mutta sitä ei esiinny dieselkäytössä likimainkaan samoja määriä. (Laukkanen 1998, 24)

3.6.1 Polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH)

Yksinkertaisin aromaattinen hiilivety on edellä mainittu bentseeni. Se koostuu kuuden hiiliatomin muodostamasta bentseenirenkaasta ja kuudesta vetyatomista. Polysyklinen aromaattinen hiilivety muodostuu useammasta hiiliatomirenkaasta, ja niiden eri yhdisteitä on löydetty yli 200. Aromaattisten hiilivetyjen nimitys johtuu niiden makeasta tuoksusta. (Raiko 1995, 300)

3.6.2 Tekniset ratkaisut päästöjen pienentämiseksi

Johtuen raskaan dieselöljyn hitaasta haihtumisesta, poltosta syntyvät hiilivety määrät ovat pieniä, ja näin ollen ne aiheuttavat ympäristölle varsin vähän haittaa. Hiilivety-päästöjen alentamiseen voidaan vaikuttaa palamisprosessin tehostamisella sekä joissain määrin polttoainesuuttimen mallilla. (Woodyard 2009, 76-77)

4 PUHDISTUSMENETELMÄT

Pakokaasujen puhdistus- ja suodatusmenetelmiä kehitellään jatkuvasti tiukentuvien päästörajoitusten myötä. Puhdistusmenetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään: moottoritekniset, katalyyttiset ja polttoainetekniset menetelmät.

4.1 Moottoritekniset menetelmät

Ratkaisut, joissa moottori on suorien tai välillisten muutosten kautta osallisena päästöjen vähentämiseen, luokitellaan moottoriteknisiksi ratkaisuuksi. Näitä ovat niin turboahtimen vaikutukset, venttiilien ajoitukset kuin palotilan jäähdytystekniikatkin.

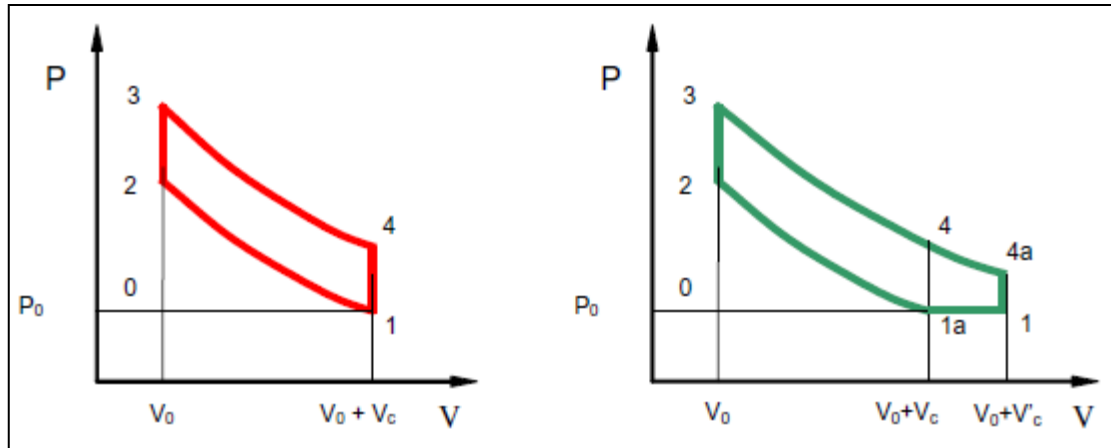
4.1.1 Miller-prosessi

Vuonna 1947 kehitetyn Miller-prosessin toiminta perustuu moottorin puristustahdin pienentämiseen aikaistamalla tai viivyttämällä imuventtiilin sulkeutumista. Menetelmän alkuperäinen tarkoitus oli parantaa moottorin tehoa alentamalla palotilan painetta ja lämpötilaa, sillä näin moottorin mekaanista kestopainetta saatiin nostettua ja moottorista saatiin suurempi teho. Menetelmän toteuttamiseksi ahtoilmaa joudutaan jäähdyttämään ja ahtopainetta nostamaan.

Aikaistetussa sulkemisessa imuventtiili suljetaan ennen imutahdin loppua ja mäntä jatkaa matkaa alakuolokohtaan, jolloin sylinterissä oleva ahtoilma paisuu. Alakuolokohdan ohitettuaan mäntä tekee puristustahdin aikana kevyemmin töitä sen aikaa kunnes, ahtoilman puristus alkaa uudestaan.

Viivästetyssä imuventtiilin sulkemisessa, venttiili pysyy auki vielä männän ohitettua alakuolokohtansa, jolloin osa sylinterissä olevasta ahtoilmosta palaa takaisin imukanavaan. Näin ollen turboahdin tekee hetken työtä mäntää vastaan, kunnes imuventtiili sulkeutuu ja puristus alkaa. Kuvan 6 oikeanpuoleisessa syklissä nähdään viivytetyn Miller-prosessin tuoma etu normaaliin dieselsykliin.

- Imutahti $0 \rightarrow 1a \rightarrow 1$
- Takaisinpuhallus $1 \rightarrow 1a$
- Puristustahti $1a \rightarrow 2$
- Sytytys ja työtahti $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 4a$
- Pakotahti $4a \rightarrow 1 \rightarrow 1a \rightarrow 0$



Kuva 6. Miller prosessin tuoma tehonlisäys näkyy käyrän pinta-alan lisäyksenä.

Tehonlisäyksen ohella Miller-prosessi alentaa tehokkaasti pakokaasujen typpioksidipäästöjä. Syynä tähän on palotilan vajaa täyttö jäädytetyllä ahtoilamalla, jonka vaikutuksesta puristussuhde pienenee ja syttymislämpötila puristustahdin päätteeksi alenee. Aikaisempien tutkimustulosten perusteella Miller-prosessilla voidaan saavuttaa jopa 20 %:n vähennys NO_x -päästöihin (Wright 2000, 205).

4.1.2 Polttoaineventtiilit

Polttoaineen epätäydellisen palamisen seurauksena syntyy palotilassa epätoivottuja päästöjä, jotka osaltaan myös heikentävät moottorin tehoa. Palotilaan suihkutetun polttoainesumun tulisi olla mahdollisimman hienojakoista, jotta se muodostaisi palamisilman kanssa hyvin syttyvän seoksen. Lisäämällä polttoaineventtiileitä saadaan polttoaine annosteltua palotilaan tasaisemmin, jolloin myös palaminen on tasaisempaa eikä lämpötilapiikkejä esiinny.

Uusimpia common rail -moottoreiden suuttimia ohjataan elektronisten solenoidiventtiilien avulla. Tekniikan avulla polttoaineen ruiskutuksen ajankohtaa voidaan hallita hyvin tarkasti ja korkeampi ruiskutusaine edesauttaa polttoaineen suihkutusta. Polttoaineen syötöstä vastaa sähköinen ohjausyksikkö, jonka avulla moottorin savutusta voidaan vähentää pienillä kuormilla ajettaessa. (Pakarinen, 2007; Heim & Brown, 2009)

Wärtsilän DF-moottoreissa (dual-fuel) voidaan polttoaineena käyttää maakaasua, kevyttä tai raskasta polttoöljyä. Moottoreissa käytettävät polttoaineventtiilit (kuva 7)

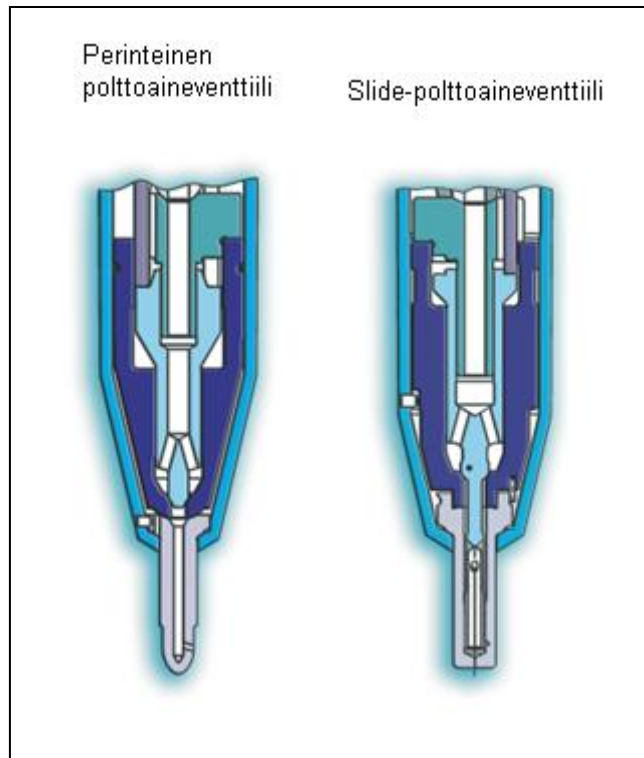
ovat kaksiosaisia; toinen suutin syöttää raskasta ja toinen kevyttä polttoöljyä (pilottipolttoaine). Maakaasukäytössä moottoriin syötetään maakaasua sekä pilottipolttoainetta (LFO), joka sytyttää kaasuihmaseoksen puristuksen loppuvaiheessa. Raskasöljykäytössä kaasun syöttö katkeaa ja polttoaineventtiili alkaa syöttää toisesta suuttimesta raskasta polttoöljyä. Raskasöljykäytössä myös pilottipolttoainesuutin jatkaa ruiskuttamista pienellä määrällä venttiilin jäähdytyksen turvaamiseksi. (Wärtsilä 50DF technology review 2007, 7)

DF-moottoreilla voidaan saavuttaa kaasukäytössä 20 %:n vähennys CO₂-päästöihin, 85–90 %:n vähennys NO_x-päästöihin sekä lähes kokonaan poistaa SO_x- ja hiukkaspäästöt (Andreola 2007, 36).



Kuva 7. Wärtsilä 50DF -moottorin polttoaineventtiili. (Wärtsilä 50DF technology review 2007, 7)

Muihin erikoisventtiileihin kuuluu muun muassa MAN B&W:n kehittämä Slide-polttoaineventtiili (kuva 8). Venttiilin rakenteen vuoksi polttoaineen ruiskutus palotilaan on tasaisempaa, palaminen tehokkaampaa ja polttoainekulutus maltillisempaa. Slide-venttiilin kärjessä olevan luistin vuoksi polttoainetta ei keräänny venttiilin kärkeen ruiskutuksen jälkeen. Tämä puolestaan vähentää polttoaineen haihtumista sekä hiilivetyjen muodostumista. Valmistajan tekemien kokeiden perusteella venttiili-asennuksella saatiin 30 %:n pudotus autolaiva *Don Juanin* NO_x-päästöihin. (News from MAN B&W 2002)

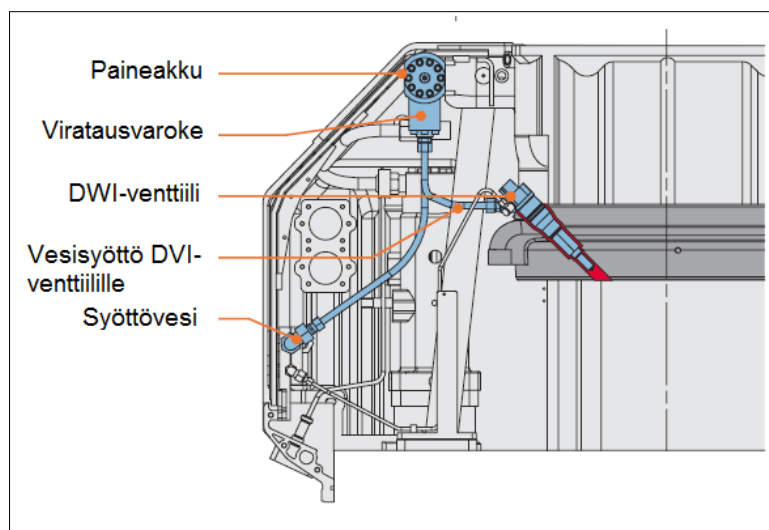


Kuva 8. Perinteinen ja MAN B&W Slide-polttoaineventtiili. (News from MAN B&W 2002)

4.1.3 Suora vesiruiskutus (DWI)

Palamislämpötilan alentaminen on osoittautunut erittäin tehokkaaksi keinoksi typen oksidien vähentämiseksi pakokaasuista. Suorassa vesiruiskutuksessa palotilaan syötetään korkealla paineella vettä, joka hajoaa suuttimessa vesisumuksi. Pienen pisarakoon ansiosta vesimassan pinta-ala on suuri, joten vesi jäähtyy palotilaa tehokkaasti höyrystyessään.

Veden syöttäminen palotilaan voidaan järjestää eri venttiileillä joko yhden tai kahden suuttimen avulla. Yhden suuttimen järjestelmässä (Mitsubishi - SFWI) vesi ja polttoaine ruiskutetaan vuorotellen samasta venttiilistä, kun taas esimerkiksi Wärtsilän DWI (Direct Water Injection) käyttää erillistä venttiiliä vedelle. Wärtsilän järjestelmä (kuva 9) on mahdollista asentaa jälkikäteen ja sen voi kytkeä pois käytöstä kesken ajon. DWI:n avulla typenoksidipäästöjä voidaan alentaa jopa 60 %, mutta se soveltuu vain vähärikkisille polttoaineille. (Wright 2000, 205–207)



Kuva 9. Wärtsilä DWI-järjestelmä. (Wärtsilä 46 technology review 2005, 7)

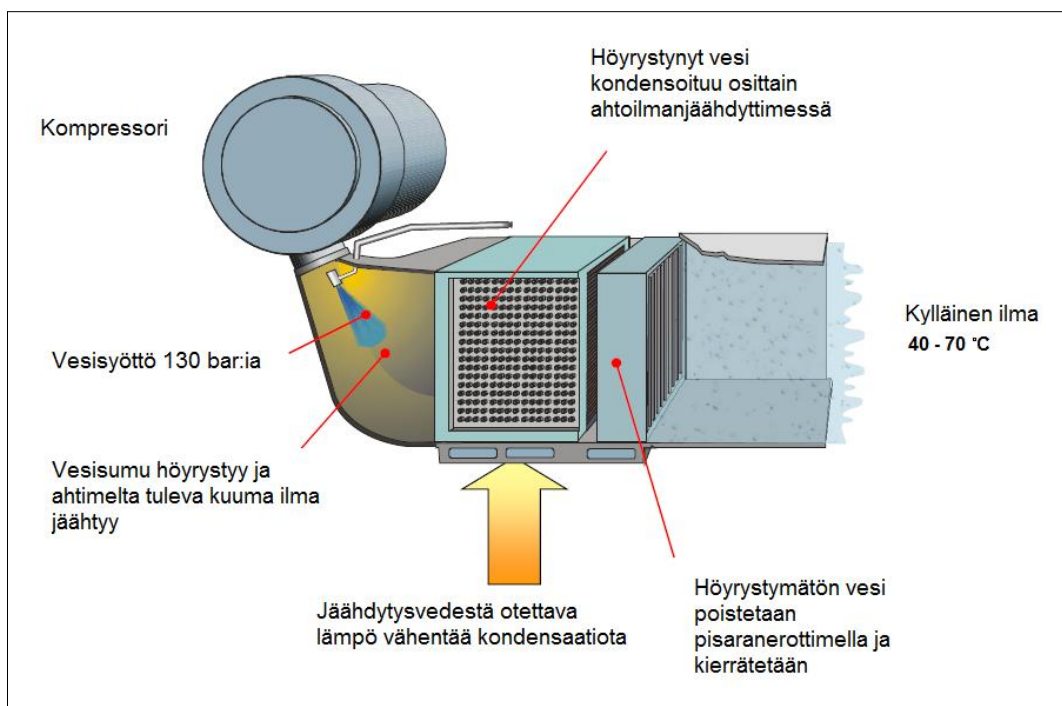
4.1.4 Jatkuva vedenruiskutus (M. A. Turbo/Engine Ltd - CWI)

Vesihöyryn lisääminen palamisprosessiin on verrattain helppo tapa alentaa palamislämpötilaa ja NO_x -päästöjä. Eräs vaihtoehto tälle on lisätä vesi järjestelmään jo ennen palotilaa. Jatkuvassa vesiruiskutuksessa tislattua tai käsiteltyä vettä syötetään palamisilman joukkoon kahdessa vaiheessa; turboahtimen ja välijäähdyttimen väliin sekä suoraan turboahtimen kompressorille. (ADB Power ApS, 3)

Moottorin ahtoilman sekaan syötetty vesi pitää kompressorin, välijäähdyttimen sekä huuhteluilmakanavan puhtaampana ja pidentää näin ollen niiden huoltoväliä. Muita etuja ovat muun muassa pienentynyt polttoaineen kulutus (noin 2,5 %) sekä noin 30 % pienemmät typpioksidipäästöt. (ADB Power ApS, 4)

4.1.5 Syöttöilman kostutus (Wärtsilä – CASS/Wetpac H)

Jatkuvan vedenruiskutuksen kaltainen mutta uudempi tekniikka on syöttöilman kostutus. Järjestelmässä (kuva 10) moottoriin syötetään turboahtimen jälkeen korkealla paineella vettä, joka höyrystyy ahtoilman lämpötilan seurauksena. Vesihöyryä voidaan edelleen lämmittää ahtoilman jäähdyttimessä, joka on muutettu lämmittimeksi. Vesihöyry-ilmaseoksesta poistetaan pisaranerottimella nestemäinen vesi, jottei se riko sylinteriholkin öljykalvoa, ja kylläinen ilma ohjataan palotilaan.

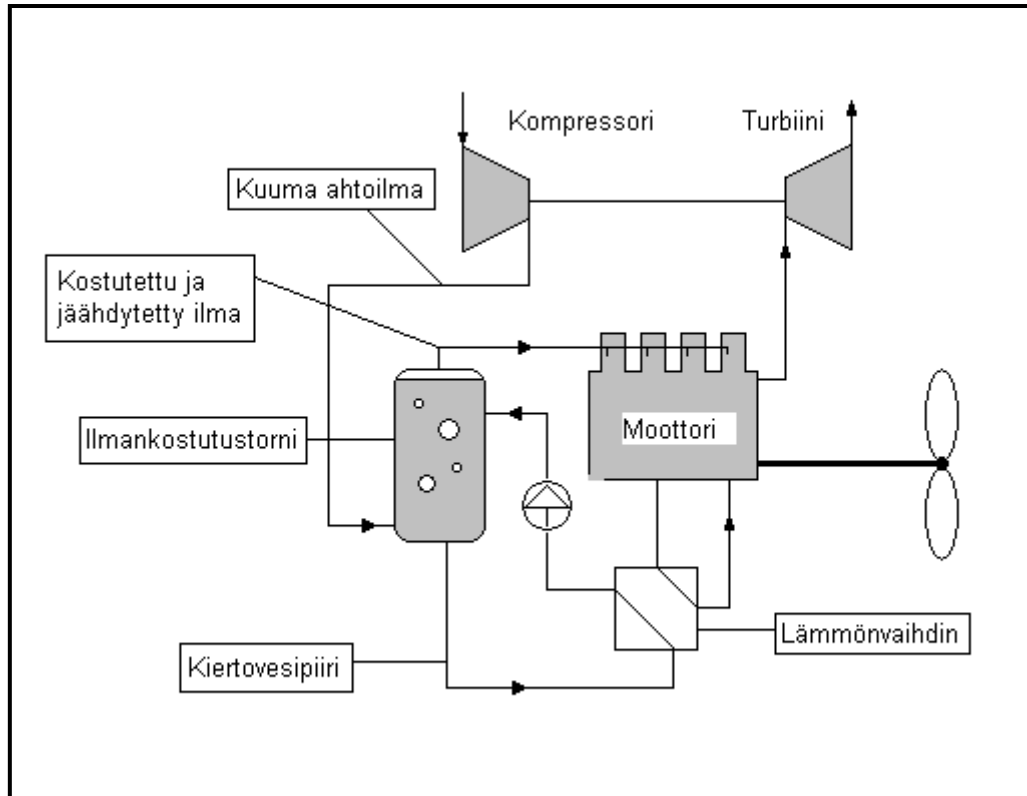


Kuva 10. Wärtsilä Wetpac syöttöilman kostutusjärjestelmä. (Hellén 2007 b, 14)

Laitteiston vedenkulutus on noin kaksi kertaa polttoaineen kulutus, riippuen ilman kosteudesta. NO_x -päästöjen vähennys on noin 30 %. (Hellén 2007 b, 14)

4.1.6 Kostean ilman moottori (MAN B&W – HAM)

MAN B&W kehittämä kostean ilman moottori on myös ahtoilman kostutukseen perustuva NO_x -päästöjen rajoituskeino. Kostean ilman moottorissa turboahtimelta tuleva kuuma ahtoilma ohjataan torniin, jossa se kostutetaan ja jäähdytetään käyttäen evaporoitua tai suodatettua merivettä (kuva 11). Tornissa olevat suuttimet ruiskuttavat kuumaa ahtoilman sekaan vettä, joka höyrystyy lämmön vaikutuksesta. Vedessä olevat epäpuhtaudet vajoavat tornin pohjalle, joka puhalletaan väliajoin. Ennen palotilaa, ahtoilma ohjataan pisaranerotimen läpi jonka jälkeen tuloilman kosteus on 99 % eli lähes kylläistä vesihöyryä. (Woodyard 2009, 73-74)



Kuva 11. HAM-moottorin periaatekuva. (Woodyard 2009, 73)

HAM-menetelmä alentaa palotilan lämpötilaa kahdella eri tavalla. Ahtoilman kyllästämisen vesihöyryllä syrjäyttää osan hapestasta, mikä puolestaan alentaa paloreaktion huippulämpöä. Toinen tekijä lämpötilan alenemiseen on ahtoilman sisältämän vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti, joka on huomattavasti korkeampi kuin ilmalla (vedellä 4,19 kJ/kgK; ilmalla 1,01 kJ/kgK). Näin ollen sama määrä kyllästettyä ahtoilmaa absorboi suuremman määrän lämpöä. (Woodyard 2009, 73)

HAM-menetelmällä on mahdollista alentaa typpioksidipäästöjä jopa 65 % ja se on saatavissa niin neli- kuin kaksitahtimoottoreillekin (Woodyard 2009, 74).

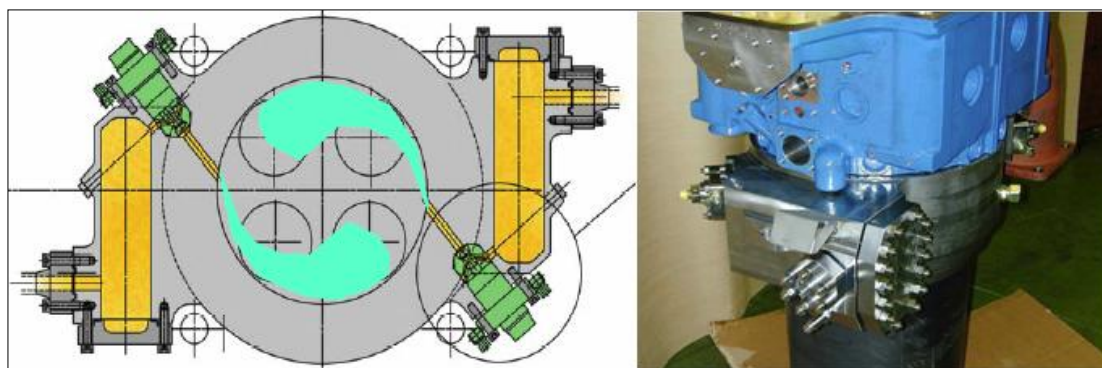
4.1.7 Dieselmoottorin höyryinjektio (STID)

Dieselmoottorien höyryinjektio on kehitetty alun perin kaasuturbiinitekniikasta (STIG). Aikaisemmin mainittujen tekniikoiden lailla eräs höyryinjektion päästöjä vähentävä mekanismi perustuu palotilan huippulämpötilan alentamiseen. Höyryinjektion avulla voidaan myös nostaa moottorin huippupainetta, mikä puolestaan parantaa

moottorin hyötysuhdetta. Paremmen hyötysuhteen myötä polttoaineen kulutus pienee ja hiilidioksidipäästöt vähenevät. (Raiko & Lehtinen 2002, 28)

Palotilaan ruiskutettava höyry lämmitetään ennen syöttöä n. 450–550 °C:n lämpötilaan, hyödyntämällä moottorin hukkalämpötilaa. Lämpöä otetaan talteen ahtoilman jäädyttimestä sekä pakokaasukattilasta, joko ennen tai jälkeen turboahtimen. Höyryn tarpeeksi korkean lämpötilan varmistamiseksi, kattiloissa voidaan käyttää apupoltinta. (Raiko & Lehtinen 2002, 29)

Höyryn ruiskutus tapahtuu paisuntatahdin alussa tai puristustahdin lopussa, erillisten suuttimen avulla, noin 250 baarin paineella (kuva 12). Höyryn vaikutuksesta moottorin paisuntatyö, ja sen myötä teho kasvaa. Menetelmä alentaa myös sylinterikaasujen lämpötilaa, jonka seurauksena termiset typenoksidipäästöt alenevat. (Raiko & Lehtinen 2002, 29)



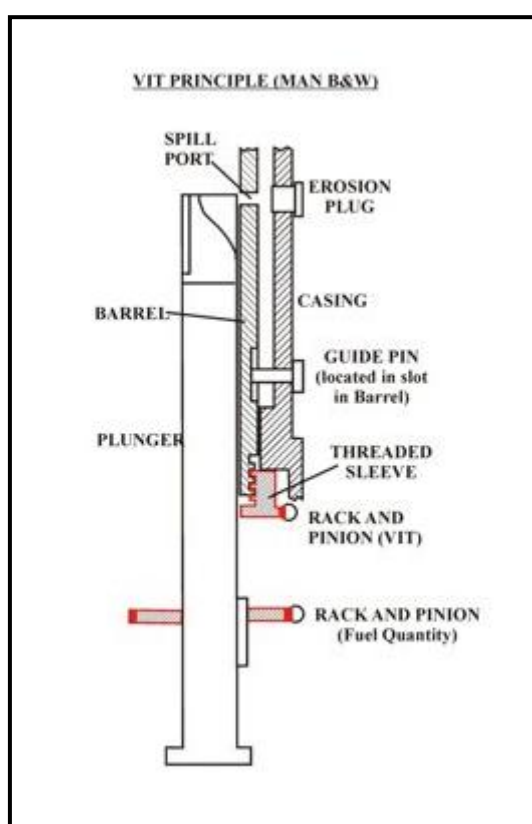
Kuva 12. STID venttiilien toimintaperiaate ja valmis asennus. (Paro 2005, 36)

Tampereen teknillisen korkeakoulun tekemien kokeiden perusteella höyryinjektiolla saavutettiin 13,5 %:n lisäys moottorin tehoon sekä n. 5,6 prosenttiyksikön hyötysuhteen nousu. Valitettavasti kattavista etsinnöistä huolimatta, tarkkoja arvoja päästövähenneksille ei löytynyt. (Raiko & Lehtinen 2002, 28)

4.1.8 Polttoaineruiskutuksen ajoitus (VIT)

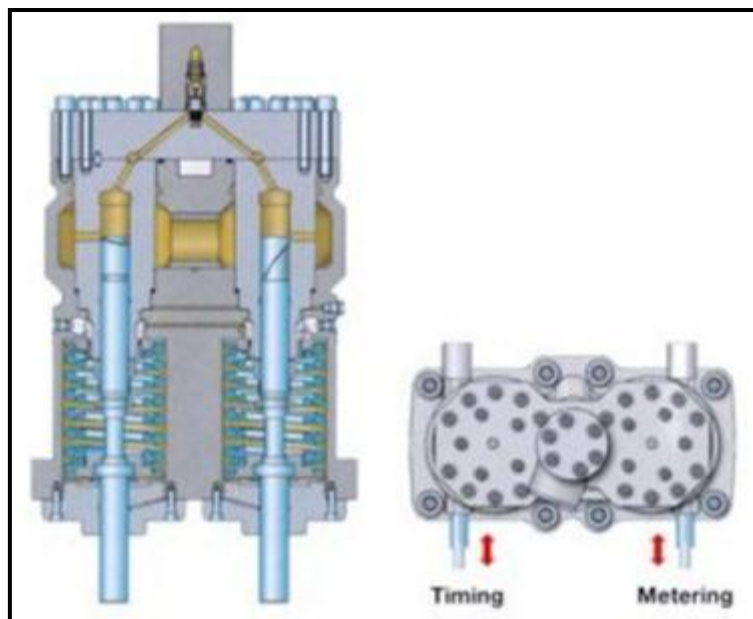
Eräs yksinkertaisimpia keinoja NO_x -päästöjen rajoittamiseksi on polttoaineen viivästetty ruiskutus palotilaan. Ruiskutuksen viivästämisen ansiosta palotilan huippulämpötila laskee ja termisten typenoksidien määrä alenee.

Teknisesti polttoaineen ruiskutus toteutetaan erityisillä polttoainepumpuilla tai elektronisesti ohjattujen polttoaineventtiileiden ja yhteispaineruiskutuksen avulla. MAN B&W:n kehittämä yksimäntäinen VIT-polttoainepumppu (kuva 13) perustuu kahden ohjaustangon avulla säädettävään ruiskutukseen. Toisella ohjaustangolla säädetään polttoainepumpun mäntää ja pumpun syöttämää polttoainemäärää. Pumpun toinen ohjaustanko säättää erillistä kierrekappaletta, joka nostaa tai laskee pumppua ympäröivää runkoa ja siinä sijaitsevaa vuotoaukkoa. Vuotoaukkoa nostamalla männän ruiskutuksen ajankohtaa voidaan viivästyttää ja vastaavasti alentamalla aikaistaa. (Valčić, 146)



Kuva 13. MAN B&W VIT-polttoainepumppun läpileikkaus. (Valčić, 146)

Wärtsilä luottaa VIT-pumpuissaan (kuva 14) kahden erillisen männän tekniikkaan. Ruiskutuksen ajoitusta ohjataan kuvassa oikeanpuoleisella männällä. Männän päässä oleva heliksi sulkee vuotoaukon, jonka vuoksi polttoaine ei pääse poistumaan pumpusta. Polttoaineen määrää säädetään toisella männällä perinteisen polttoainepumpun tapaan. (Valčić, 94)



Kuva 14. Wärtsilä VIT-polttoainepumpun läpileikkaus (Valčić, 94)

VIT-tekniikalla voidaan saavuttaa n. 20 %:n alennus NO_x -päästöihin, mutta sen heikoutena on kohonnut polttoaineen kulutus. Polttoaineen kulutus nousee 1,5–5 % jokaista 10–15 NO_x -pitoisuusprosenttia kohden. Lisäksi polttoaineen viivästetyllä ruiskutuksella voi olla savuttava ja partikkeleita lisäävä vaikutus, mikäli palamisaikaa sylinterissä vähennetään liiaksi. (Wright 2000, 204)

4.1.9 Muita menetelmiä

Vuonna 1994 kehitetty low NO_x Vaasa 32 -moottori oli ensimmäinen Wärtsilän low NO_x -tekniikkaa hyödyntävä moottori. Moottorin puristussuhdetta nostettiin 12:1:stä 14:1:een, ja sen vuoksi männänpää sekä sylinterikansi oli suunniteltava uudelleen. Pienemmän palotilan sekä korotetun sylinteripaineen vuoksi mäntään suunniteltiin uusi jäähdytysjärjestelmä ja männänpään muotoa muutettiin paremman polttoaineilmaseoksen saavuttamiseksi. Moottorin uusien toimintasuhteiden vuoksi myös polttoaineventtiilit vaihdettiin tehokkaampiin. Syöttöpaine nostettiin 350 baarista 600 baariin, millä varmistettiin polttoaineen hienompi hajoaminen ja nopeampi syttyminen. Edeltäjänsä verrattuna low NO_x Wärtsilä 32 saavutti 30 %:n vähennyksen NO_x -päästöihin sekä 7 g/kWh vähennyksen polttoainekulutukseen. (Wright 2000, 674–675)

Myös muut moottorivalmistajat ovat tuoneet markkinoille omia ympäristöystävällisempiä moottoreitaan. Näistä valmistajista voidaan mainita muun muassa MAN B&W

sekä Caterpillar, joiden vähäpäästoiset moottorit hyödyntävät useita aikaisemmin mainittuja tekniikoita samanaikaisesti. Caterpillarin ACERT-tekniikkaa käytetään nopeissa dieselmootoreissa, ja se perustuu palotilan uudelleensuunnitteluun, elektroniiseen ohjaukseen ja turboahtimen hukkaportin käyttöön. Nopeatahtisia dieseleitä käytetään laivoilla kuitenkin yleensä vain hätä- tai satamageneraattoreina, eikä niiden osuus kokonaispäästöistä ole kovinkaan suuri. (ACERT diesel engines 2004)

4.2 Pakokaasujen käsittely

Moottoritekniisten järjestelmien kyky vähentää päästöjä on rajallinen, ja pelkästään niiden avulla tuskin koskaan päästään täydelliseen tulokseen. Moottorin jälkeen tapahtuva pakokaasujen puhdistus edesauttaa päästöjen vähentämistä, ja lisäksi sen avulla voidaan puhdistaa myös rikkiä, mikä on moottoritekniisesti vaikeaa. Muuttamalla pakokaasujen ominaisuuksia voidaan laivaliikenteen ilmansaasteita vähentää joko välillisesti tai suoraan. Välillisessä puhdistuksessa pakokaasujen ominaisuuksia käytetään hyödyksi esimerkiksi lämmityksen tai uusiokäytön avulla.

4.2.1 Pakokaasun takaisinkierrätys (EGR)

Autoliikenteessä, jossa polttoaineet ovat verrattain puhtaita, on EGR-tekniikkaa käytetty hyvällä menestyksellä jo pidemmän aikaa. Tekniikka perustuu suodatettujen ja kostutettujen pakokaasujen osittaiseen palauttamiseen palotilaan ahtoilman mukana. Korvaamalla osa ahtoilmasta pakokaasuilla alennetaan palamisilman happipitoisuutta ja lämpötilaa. Palamistapahtuman huippulämmön alenemisen myötä myös NO_x-päästöt pienenevät.

Laivakäytössä, jossa pääasiallisena polttoaineena on raskasöljy, EGR:n käyttöönotto on astetta monimutkaisempaa. Palamisen seurauksena pakokaasuihin jää jäännöstuotteita, jotka aiheuttavat moottorissa kulumista sekä likaantumista. Korkearikkiset polttoaineet voivat myös aiheuttaa korroosiota imukanavassa sekä turboahtimissa. Näiden seikkojen vuoksi pakokaasujen suora palautus palotilaan ei ole suositeltavaa.

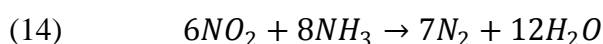
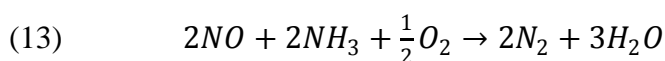
MAN Diesel on kehittänyt rikkipesuria hyväksi käytettävää EGR-järjestelmää kaksitahtimoottoreihinsa. Osa pakokaasusta ohjataan säätöventtiilin kautta rikkipesurille, jossa

kaasusta poistetaan rikki ja sen lämpötila alenee. Rikinpoiston jälkeen pakokaasut puhalletaan imuilman joukkoon ja ajetaan ahtoilman jäähdyttimen läpi takaisin moottorille. Rikin märkäpesua varten laitteistossa on vedenkäsittelyjärjestelmä, joka tulee aika ajoin puhdistaa syntyneestä lietteestä. Järjestelmällä on saavutettu 60–70 %:n vähennys typenoksidipäästöihin ilman huomattavaa moottorin kulumista. (Woodyard 2009, 74–76)

4.2.2 Katalysaattori (SCR)

Moottoritekniisiä menetelmiä hyväksi käyttäen saavutetaan yleensä varsin hyvät päästöarvot, varsinkin jos eri menetelmiä käytetään samanaikaisesti. Eri puolilla maailmaa on kuitenkin vaihtelevia rajoitusmääräyksiä ja joissakin tapauksissa edellä mainituilla tekniikoilla ei välttämättä päästä vaadittaviin arvoihin. Mikäli moottoritekniset menetelmät eivät riitä, on olemassa vielä muutama vaihtoehto: puhtaampi polttoaine tai pakokaasujen jälkikäsittely. Polttoaineen vaihtaminen voi olla teknisesti mahdotonta tai epätaloudellista jolloin järkevämpi vaihtoehto on pysyvä ratkaisu, kuten SCR-katalysaattori.

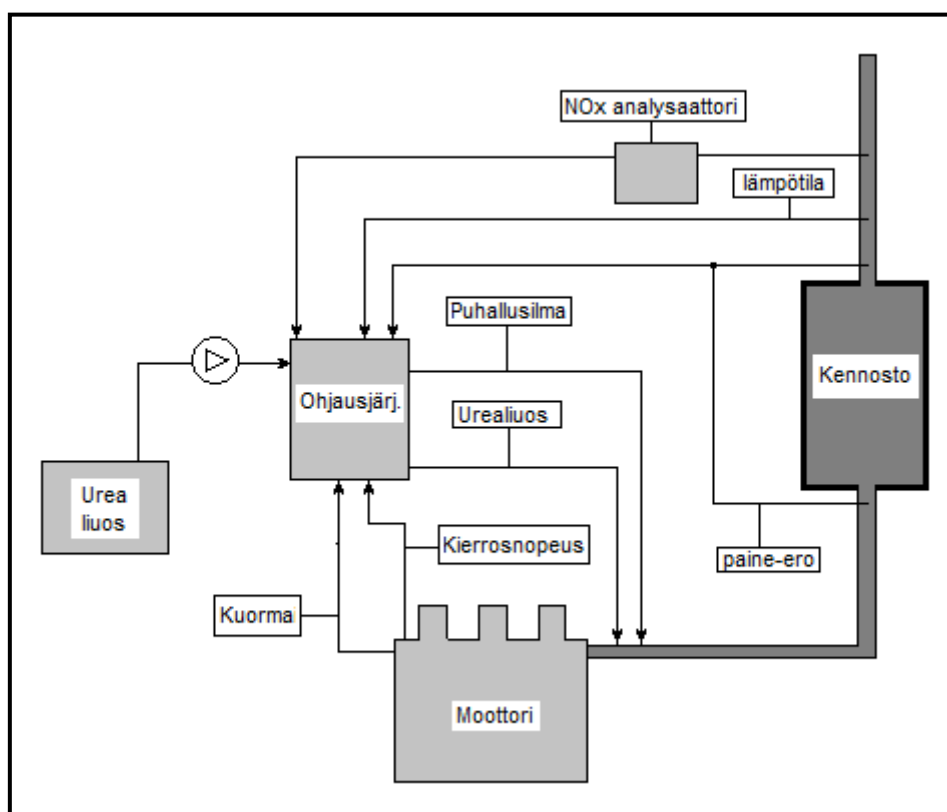
Katalysaattorin toiminta perustuu ammoniakkin kykyyn reagoida typenoksidien kanssa muodostaen vettä ja typpeä. Ammoniakin vaarallisten ominaisuuksien vuoksi laivoilla käytetään yleensä ureaa. Ureaa varastoidaan joko nestemäisenä tai kuiva-aineena, josta sekoitetaan makean veden kanssa noin 40-prosenttista liuosta. Liuos ruiskutetaan pakokaasujen joukkoon, johon se sekoittuu tasaisesti turbulenssien sekä hienon sumun ansiosta. Pakokaasujen korkean lämpötilan ansiosta urea muodostaa ammoniakkia (NH_3) ja hiilidioksidia. Muodostunut ammoniakki reagoi katalysaattorin pinnalla pakokaasujen typenoksidien (NO , NO_2) kanssa muodostaen typpeä ja vesihöyryä (13). (Woodyard 2009, 78; Wright 2000, 214)



Itse katalysaattori koostuu kuumakestävästä kennoista, jotka on pinnoitettu katalyyttisellä materiaalilla (vanadiinioksidi, titaanioksidi). Nämä kennot sijaitsevat ennalta määritetyn matkan päässä urean ruiskutuspaikasta, ja ne mitoitetaan konekohtaisesti

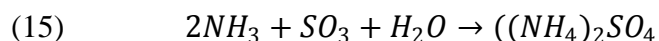
oikean reaktiopinta-alan varmistamiseksi. Jälkiasennuksissa katalysaattori voidaan asentaa äänenvaimentajan paikalle. (Wright 2000, 214)

Urean ruiskutus tapahtuu järjestelmässä automatisoidusti (kuva 15). Ohjauslogiikka tarkkailee moottorin arvoja ja syöttää ureaa pakokaasujen joukkoon tarvittavan määrän tai ei lainkaan. Ohjauslogiikka seuraa moottorin kierroksia sekä kuormaa, mutta myös pakokaasujen lämpötilaa, typenoksidiarvoja sekä paine-eroa katalysaattorikennosten yli. Mikäli katalysaattorin kennosto on tukkeutunut tai pakokaasuihin syötetään liiaksi ureaa, ei kaikki ammoniakki reagoi typenoksidien kanssa. Reagoimaton, myrkyllinen ammoniakki pääsee puhdistettujen pakokaasujen joukossa ilmaan, mikä lisäksi järjestelmän taloudellisuus laskee. (Woodyard 2009, 78; Wright 2000, 214)



Kuva 15. SCR-katalysaattorin toimintakaavio keskinopealle moottorille. (Wright 2000, 213)

Riippuen käytetyn polttoaineen rikkipitoisuudesta pakokaasujen lämpötilan tulee olla katalysaattorille saapuaessa 290–450 °C. Alhaisemmassa lämpötilassa pakokaasujen rikkitrioksidi (SO₃) sekä ammoniakki pyrkivät muodostamaan ammoniumsulfaattia (15), joka tukkii ja syövyttää katalysaattorin kennoja.



Pakokaasujen liiallinen lämpötila puolestaan hapettaa ammoniakkin, jolloin se ei reagoi typenoksidien kanssa. Tämän vuoksi SCR-katalysaattoria käytetäänkin pääasiassa vähärikkisillä polttoaineilla tai vaihtoehtoisesti se kytketään päälle vasta, kun moottori käyttää sopivaa polttoainetta. Polttoaineen vaihto ja katalysaattorin kytkentä tulevat kyseeseen yleensä lähestyttäessä päästörajoitusalueita. (Woodyard 2009, 78; Wright 2000, 217)

SCR-katalysaattoreilla on teoriassa mahdollista puhdistaa jopa 100 % typenoksideista. Saavutettua hyötyä tulee kuitenkin tarkastella kriittisesti, sillä mitä tiukempia päästövähennyksiä laitoksella pyritään saavuttamaan, sitä suurempi on todennäköisyys reagoimattoman ammoniakkin karkaamiselle pakokaasujen mukana. Nykyisillä laitoksilla on saavutettu noin 95 %:n turvallinen puhdistusaste typenoksideille. Pidemmälle kehitetyt katalysaattorit, kuten Siemensin SINOx, pystyvät myös vähentämään muita päästöjä, kuten hiilivetyjä, hiilidioksidia ja tuhkaa. (Wirght 2000, 214)

Järjestelmän varjopuolena voidaan pitää sen taloudellisia vaikutuksia. Pounder's Marine Diesel and Gas Turbines mainitsee kuluiksi:

- Sijoituskustannukset: 40–70 \$/kW
- Käyttökustannukset: 3–4 \$/MWh
- Urean kulutus: 15–20 l/h/MW

Kulut koostuvat kennojen vaihdoista ja urealiuoksen kulutuksesta minkä lisäksi installaatiot vievät tilaa, joka voi olla pois lastitilasta.

4.2.3 Rikkipesuri

Bunkkeriöljyn rikkipitoisuudet vaihtelevat öljyn maantieteellisen alkuperän mukaan 0,5–4,0 %:n välillä. IMO on ottanut tavoitteekseen alentaa laivaliikenteen rikkipäästöjä asteittain vuoteen 2020 asti, jolloin polttoaineiden rikkipitoisuus saa olla korkeintaan 0,5 %. Tätäkin tiukemmat rajoitukset koskevat SECA-alueita, joihin muun muas-

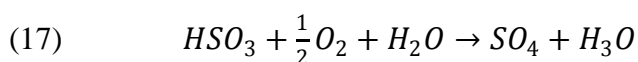
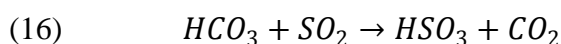
sa Itämeri kuuluu. Näillä alueilla on 1.7.2010 lähtien voinut käyttää vain rikkipitoisuudeltaan 1,0-prosenttista polttoainetta, ja vuonna 2015 siirrytään 0,1-prosenttisiin polttoaineisiin.

Polttoaineiden rikkipitoisuuksia on mahdollista alentaa jalostamoilla. Vähärikkisten polttoaineiden valmistus on kuitenkin monimutkaisempi prosessi, mikä nostaa polttoaineen hintaa. Tämän lisäksi kysynnän kasvaessa öljyntoimittajien on sijoitettava uusiin jalostamoihin toimitusten varmistamiseksi. Sijoitukset puolestaan siirtyvät edelleen polttoaineen hintaan. Lisäksi on myös syytä miettiä, mikä vaikutus uusilla jalostamoilla on ympäristölle.

Koska laivan käyttökustannuksista suuri osa aiheutuu polttoainekuluista, aiheuttaa polttoaineen hinnannousu varustamoille taloudellisia haasteita. Rikin poistaminen polttoaineesta ei ole polttoteknisesti mahdollista, mutta teollisuudessa on jo pitkään puhdistettu savukaasuja rikkipesureilla. Rikkipesulaitosten kehittämiseen on panostettu viime vuosina huomattavasti, ja muun muassa Wärtsilän valmistamia laitoksia on jo asennettu koekäyttöön (Neste Oil: M/T Suula). Laitoksien avulla on mahdollista käyttää korkeampiriikkistä polttoainetta, sillä niiden avulla savukaasujen sisältämä rikki voidaan vähentää vaaditulle tasolle (6,0 g/kWh). Rikkipesurien käyttöä on määritelty tarkemmin MARPOL 73/78-yleissopimuksessa sekä Suomen laissa (LIITE 2).

4.2.3.1 Merivesipesu

Laivakäyttöön kehitettyjen laitoksien kyky poistaa rikkiä pakokaasuista perustuu kemialliseen reaktioon, joka voidaan toteuttaa eri tavoin. Käytännöllisin keino laiva-asennuksissa on käyttää ympäröivää merivettä puhdistukseen, jolloin sen sisältämä bikarbonaatti (HCO_3) reagoi rikkidioksidin (SO_2) kanssa (16) muodostaen vetysulfiittia (HSO_3) sekä hiilidioksidia. Vetysulfiitti puolestaan reagoi hapen sekä veden kanssa, jolloin lopputuotteena saadaan sulfaatti-ioni ja oksonium-ioni (17).

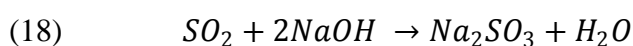


Menetelmän tehokkuus perustuu meriveden korkeaan alkaliniteettiin, jolla tarkoitetaan veden kykyä vastustaa pH:n muutosta ja neutralisoida happoja. Alkaliniteetti määräytyy veden sisältämien emäksisten yhdisteiden määrästä, jotka kulkeutuvat mereen valuma-alueilta. Puhdistusprosessissa savukaasut ohjataan haponkestävään kammioon, jossa niitä jäähdytetään rikkihapon kastepisteen tasolle ja pestään merivedellä. Puhdistusvesi voidaan joutua ajamaan hapettimen läpi, mikäli rikkitrioksidi (SO₃) ei hapetu kokonaan sulfaatiksi pesurissa. Lopullinen puhdistusvesi ajetaan takaisin mereen, jossa se laimenee nopeasti meren oman sulfaattipitoisuuden tasolle eikä näin ollen aiheuta ympäristöhaittoja. Tekniikalla voidaan päästä rikin oksidien kohdalla jopa 90 %:n puhdistusasteeseen, minkä lisäksi laitteistolla voidaan vähentää pienhiukkasmääriä. Pakokaasuja voidaan pesurin jälkeen edelleen käsitellä katalysaattorilla edellyttäen, että rikkipitoisuudet savukaasuissa ovat tarpeeksi alhaiset. (Wright 2000, 224–226; Henriksson 2007, 57)

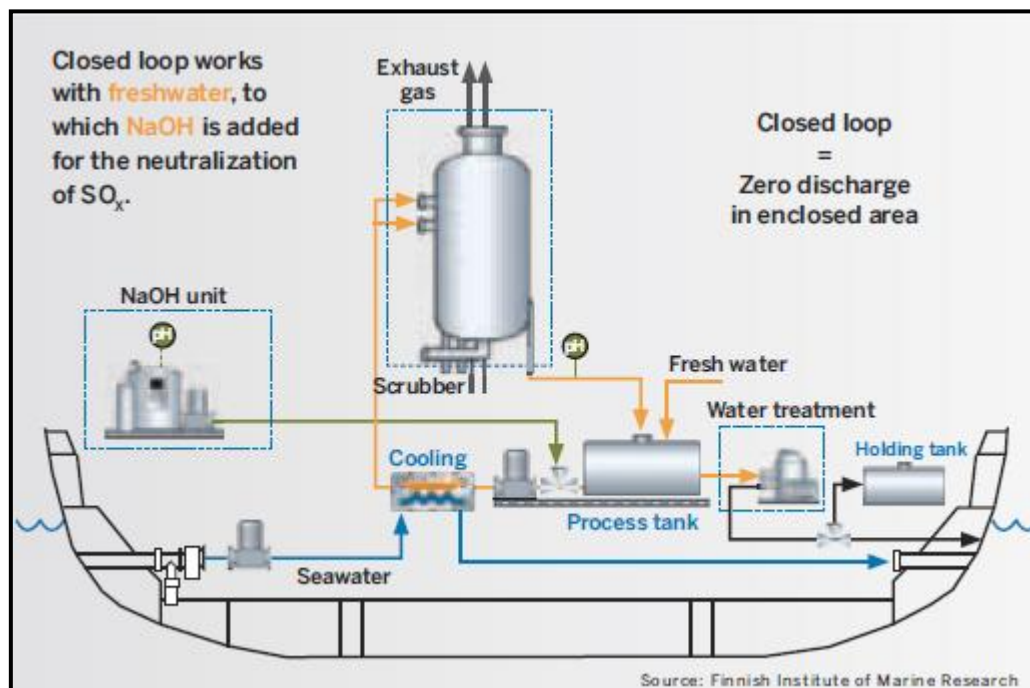
Valumavedet rapauttavat peruskalliota, josta irtoava mineraaliaines rikastuttaa ympäröiviä vesistöjä. Suomen graniittisesta peruskalliosta vapautuu kuitenkin heikosti mineraaleja, minkä vuoksi valumavedet eivät merkittävästi lisää merialueidemme alkaliniteettia. Tämän lisäksi Itämeren huono veden vaihtuvuus ja murtovesi tekevät merivesipesurin käytöstä ongelmallista. Alhaisen alkaliniteetin vuoksi joudutaan pesuriin pumppaamaan suurempia määriä merivettä riittävän puhdistustuloksen saavuttamiseksi. Kymenlaakson ammattikorkeakoulussa vuonna 1998 suoritetuissa tutkimuksissa, merivettä laskettiin kuluvan noin 7 kuutiota yhtä puhdistettua rikkidioksidikiloa kohden. (Henriksson 2007, 55–58; Huhtinen ym. 1998, 22–25)

4.2.3.2 Makeavesipesu

Alueilla, joilla meriveden käyttö rikinpoistossa on ongelmallista, on mahdollista hyödyntää niin kutsuttua suljetun kierron järjestelmää. Wärtsilän kehittämä, kuvan 16 mukainen makeavesipesu perustuu merivesipesurin tavoin pesuveden ominaisuuteen neutralisoida happoja. Laitoksen tehokkaamman toiminnan lisäksi pesuveden lisätään lipeäliuosta (NaOH), joka reagoi pakokaasujen rikin kanssa muodostaen natriumsulfiittia sekä vettä (18). (Henriksson 2007, 57)



Laitteisto käyttää pesuvetenä aluksella tuotettua makeaa vettä. Vesi pumpataan prosessisäiliöstä merivesijäähdyttimen kautta rikkipesurille josta se palaa painovoiman avulla takaisin säiliöön. Kierron aikana pesuveteen lisätään 50-prosenttista lipeäliuosta, joka reagoi pesurissa rikkihapon kanssa. Puhdistuksen jälkeen pakokaasuista poistetaan ylimääräinen kosteus, jolla voidaan kompensoida kierron aikana menetettyä liuosta. Kierron aikana pesuvettä käsitellään myös puhdistuslaitoksella, jossa siitä poistetaan meriympäristölle haitalliset ainesosat. Lopullinen puhdistettu pesuvesi voidaan pumpata vaarattomasti mereen tai vaihtoehtoisesti ennalta määriteltyyn säilytystankkiin. (Henriksson 2007, 57)



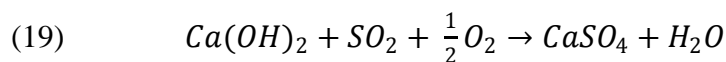
Kuva 16. Wärtsilän kehittelemän makeavesipesurin periaatekaavio. (Henriksson 2007; 57)

Laitteistolla voidaan saavuttaa jopa 96 %:n puhdistusaste rikin oksideille ja se voidaan katalysaattorin tavoin jälkiasentaa aluksen äänenvaimentimen tilalle tai vaihtoehtoisesti rungon ulkopuolelle. Lipeäliuoksen ja puhdistusveden säilytyksestä saattaa aiheutua lastitilan menetyksiä, minkä lisäksi muita kustannuksia syntyy laitoksen asennuksesta, käytöstä, huollosta sekä lipeän kulutuksesta. Lipeän hinta on markkinoilla noin 200 €/t (www.icispricing.com 21.6.2010) ja sen kulutus on noin 3,2 m³ päivässä. (Henriksson 2007, 57)

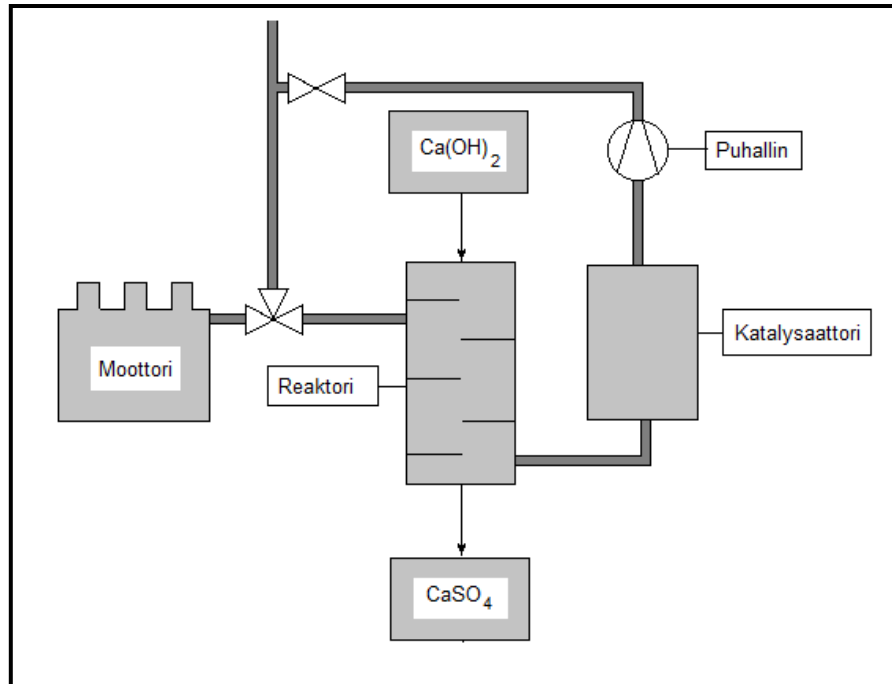
Rikkipesuriin sijoitetun pääoman tuoton voidaan olettaa tulevaisuudessa kasvavan verrattuna vähärikkisen polttoaineen käyttöön. IMO:n asettamien rikkipäästörajojen lähestyessä vähärikkisen polttoaineen kysyntä oletettavasti nousee ja sen myötä myös sen hinta. Työn kirjoitushetkellä raskaan polttoöljyn (HFO) ja vähärikkisen kaasuöljyn (MGO) hintaero oli satamasta riippuen noin 250 \$/t (www.bunkerworld.com 21.6.2010). (Kalli, Karvonen & Makkonen 2009, 18–19)

4.2.3.3 Kuivapesu (DryEGCS)

Couple Systems GmbH on myös kehittänyt oman versionsa rikkipesurista. DryEGCS-nimellä markkinoitava laitos toimii kuivan kalsiumhydroksidin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) eli sammutetun kalkin avulla. Puhdistuslaitos ei käytä nestemäistä pesutekniikkaa, vaan kuumat savukaasut ohjataan kemikaalijakeella täytettyyn reaktoriin, jossa ne reagoivat kaavan 19 mukaisesti muodostaen kipsiä (CaSO_4). (Couple Systems 2009)



Laitteistossa (kuva 17) käytettävät kuiva-aineet syötetään reaktorille laitteen päältä. Puhdistettavat savukaasut ohjataan reaktoriin sivusuunnassa, josta ne kulkeutuvat jakkeen lomitse edelleen katalysaattorille. Painehäviön kompensoimiseksi järjestelmässä on myös apupuhallin ja tarvittaessa koko järjestelmä voidaan ohittaa. Puhdistuksessa käytetty rae tyhjenetään reaktorin alta ja siirretään säilytystankkiin odottamaan purkausta. (Couple Systems 2009)

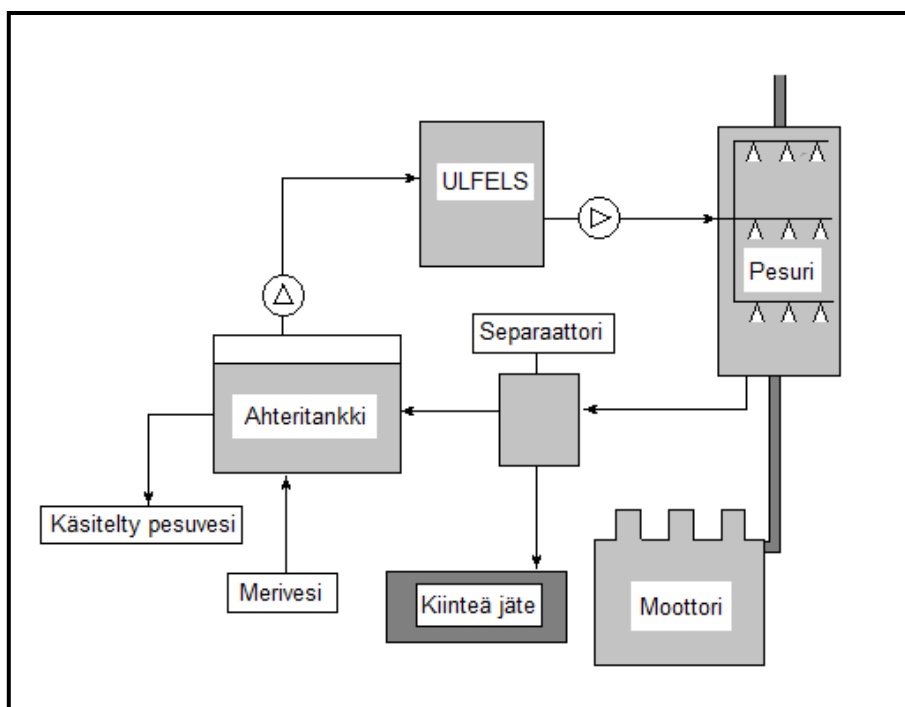


Kuva 17. DryEGCS järjestelmän periaatekuva ilman valvontalaitteita.

Laitos on ollut vuoden 2009 joulukuusta lähtien koekäytössä rahtilaiva *M/S Timbusilla*, ja sillä on valmistajan mukaan päästy tänä aikana jopa 99 %:n puhdistusasteeseen rikin oksidien osalta. Laitoksen käyttämä sammutettu kalkki muuttuu reaktorissa kipsiksi, joka voidaan hävittää polttamalla tai maantäytteenä, joten vesistöihin ei tarvitse laskea lopputuotteita. Laitoksen kustannuksiin voidaan asennus-, korjaus- ja käyttökustannusten lisäksi laskea reagenssin hankinnasta ja hävittämisestä aiheutuvat kulut. (The Motorship 2009; Couple Systems 2009)

4.2.4 Yhdistelmäpesuri (CSNO_x)

Yhtenä potentiaalisena ratkaisuna pakokaasujen puhdistukseen voidaan pitää Ecospecin CSNO_x-yhdistelmäpesuria (kuva 18), jolla on mahdollista vähentää hiilidioksidi-, rikkidioksidi- sekä typenoksidipäästöjä yhdellä keskitetyllä laitoksella. Puhdistus perustuu yhtiön ULFELS (Ultra-Low Frequency Electrolysis System) -laitteistoon, jolla meriveden alkaliniteettia ja pH-arvoa voidaan nostaa ilman lisättyjä kemikaaleja. Tekniikan avulla merivesipesuri ei ole enää riippuvainen käytetyn veden ominaisuuksista, joten sitä on mahdollista käyttää niin makeassa kuin suolaisessakin vedessä.



Kuva 18. Ecospecin CSNO_x-järjestelmä makeavesikäytössä. Merivesilaitoksessa on lisäksi vedenpuhdistuslaite.

Puhdistukseen käytetty vesi johdetaan merivesikaivosta erityisen matalataajuuspuhdistimen (ULF) läpi, jonka synnyttämät värähtelyt tuhoavat haitalliset eliöt vedestä. Puhdistuksen tarkoituksena on suojata putkistoa eläinperäiseltä likaantumiselta. Puhdistuksen jälkeen vesi johdetaan ULFELS-kammioon, jossa sen pH-arvoa ja alkaliniteettia nostetaan elektrolyysin avulla. Käsitelty vesi ruiskutetaan sumuttimien avulla kolmessa tasossa pesuriin, jossa se reagoi pakokaasujen kanssa muodostaen sulfaattia (SO₄), karbonaattia (CO₃), bikarbonaattia (HCO₃), typpeä sekä happea. Käytetty pesuvesi valuu seuraavaksi separaattoriin, jossa siitä poistetaan kiinteät epäpuhtaudet. Lopuksi pesuvesi ajetaan tankkiin, josta se voidaan joko ottaa uudelleen kiertoon tai laskea mereen. Pesueden sisältämät ainesosat ovat merivedelle tyypillisiä, eivätkä ne aiheuta veden pilaantumista tai happamoitumista. (CSNO_x-esite)

Laitteisto on työn kirjoitushetkellä koekäytössä singaporelaisella Aframax-tankkerilla, eikä asennuskustannuksista toistaiseksi ole tietoa. Laitos on osoittautunut testeissä tehokkaaksi puhdistuskeinoksi ja amerikkalaisen luokituslaitos American Bureau of Shippingin teettämässä testeissä se kykeni vähentämään pakokaasupäästöjä seuraavasti:

- SO₂ 98,6 – 98,9 %
- CO₂ 76,5 – 77,1 %
- NO_x 64,5 – 66,2 %

Testeissä käytetty polttoaine oli rikkipitoisuudeltaan 3,64 % sekä tiheydeltään 380 cSt, joten testien perusteella se täyttää IMO:n tämän hetkiset sekä suunnitellut päästörajoi-
tukset. (Ecospec tiedote 2010; CSNO_x-esite)

4.3 Muita mahdollisia tekniikoita

Varustamot ovat perinteisesti olleet vastentahtoisia ottamaan uutta tekniikkaa käyttöönsä, mikäli vanha toimii luotettavasti. Taktiikka on ymmärrettävää, mikäli se palvelee varustamoiden taloutta ja vakavarautta. Polttoaineiden nousevat hinnat sekä päästörajoi-
tukset ovat kuitenkin viime aikoina ajaneet varustamoja ottamaan riskejä ja kokeilemaan uusia, innovatiivisempia ratkaisuja propulsio- ja laivasuunnittelun suhteen. Ehdotetuista tekniikoista kaikki eivät ole uusia, ja ratkaisuja etsittäessä on otettu esille muun muassa sellaisia vaihtoehtoja, kuten ydinvoiman käyttö sekä purjeet.

4.3.1 Ydinkäyttö

Yleisen ydinvoimavastaisuuden ja ydinvoimapelon vuoksi ydinkäyttöisiä siviilialuksia on tällä hetkellä liikenteessä vain muutamia. Pääasiassa ydinenergiaa hyödyntävät sotilaalliset alukset, kuten ydinsukellusveneet ja suuret lentotukialukset. Sota-alusten lisäksi siviilikäytössä toimii Venäjän arktisilla vesialueilla joitakin ydinkäyttöisiä jäänmurta-
jia. Ydinenergian hyödyntäminen näissä aluksissa on luonnollista, sillä polttoainesauvojen vaihtoväli voi olla jopa 5–10 vuotta, ja lisäksi alukset tarvitsevat paljon tehoa.

Aluksissa käytettävät reaktorit ovat painevesireaktoreita (PWR, Pressure Water Reactor), joissa höyry tuotetaan erillisten höyrystimien avulla. Reaktorin kanssa kosketuksessa oleva vesi kiertää korkeapaineisena omassa piirissään (primääripiiri), joka kuumentaa höyrystimissä olevan kiertopiirin (sekundääripiiri) vettä. Sekundääripiirissä muodostunut höyry johdetaan turbiineille, jotka voivat tuottaa sähköä tai propulsio-
voimaa. Esimerkkinä mainittakoon venäläinen Arktika-luokan jäänmurtaja, jonka

voimanlähteenä toimii kaksi OK-900a reaktoria. Tehoiltaan ne ovat 171 MWt per yksikkö ja välittävät turbiinien kautta potkureille yhteistehoa 54 MW. (World Nuclear Association)

Ydinvoimankäyttöisten alusten hyviin ominaisuuksiin voidaan riittoisan polttoaineen lisäksi laskea myös suuri teho verrattuna tilantarpeeseen sekä niiden ilmastoystävällisyys. Kasvihuonekaasurajoitusten kiristyessä, ydinkäyttöisille aluksille olisi käyttöä muun muassa seuraavissa tehtävissä:

- Suuren sähkönkulutuksen omaavat alukset, kuten risteilijät (reaktorin tuotto n. 70 MWe)
- Linjaliikenteessä olevat raskaat alukset (suuri propulsiovoima)
- Nopeat rahtialukset

(World Nuclear Association)

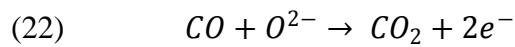
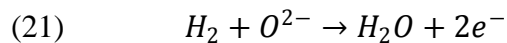
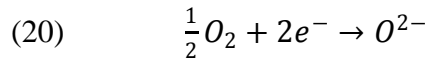
4.3.2 Polttokennot

Polttokenno on laite, joka muuttaa polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköksi sekä lämmöksi tehokkaammin kuin perinteiset polttomoottori-generaattorit. Laivaliikenteelle vartenotettavat polttokennoteknologiat jakautuvat pääasiassa kahteen eri tyyppiin: kiinteäoksidipolttokennoon (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell) sekä sulakarbonaattipolttokennoon (MCFC, Molten Carbonite Fuel Cell). Kennot käyttävät sähkökemialliseen reaktioon helposti hapettuvaa ainetta, kuten vetyä, joten polttoaineena voidaan käyttää muun muassa metanolia tai maakaasua. Edellä mainitut polttokennot tuottavat käytössä huomattavan määrän lämpöä, jota hyödyntämällä voidaan päästä jopa 70–80 %:n hyötysuhteeseen. (Marine Propulsion 4-5/2008, 55–56)

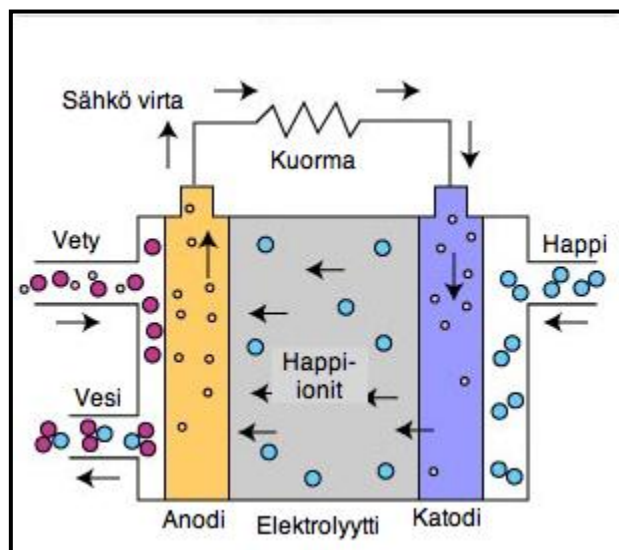
4.3.2.1 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)

Polttokennoissa, kuten kaikissa sähkölaitteissa, toiminta perustuu elektronivirtaan ja ne koostuvat anodista, katodista sekä elektrolyytistä. SOFC-kennossa elektrolyytti on kiinteää, oksidi-ioneja siirtävää materiaalia. Kennosta saadaan sähkövirtaa, kun katodille ohjattava ilma hapettuu ulkoisen kuorman kautta saapuvan elektronivirran avulla

(20). Happi-ionit alkavat virrata elektrolyytin läpi anodille, jossa ne reagoivat syötetyn polttoaineen kanssa. Ionit hapettavat polttoaineen sisältämän vedyn vedeksi (21) ja hään hiilidioksidiksi (22). Reaktion yhteydessä vapautuu elektroneita, jotka puolestaan kulkeutuvat takaisin katodille, mikäli virtapiiri on kytketty. Prosessi toistaa itseään niin kauan, kun polttoainetta ja ilmaa syötetään kennoon. Kuvassa 19 on havainnollistettu prosessin vaiheet. (Nissilä 2010, 24)



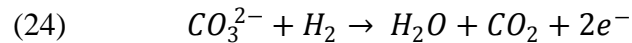
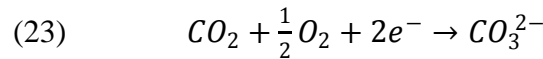
Wärtsilän ja VTT:n yhteistyössä kehittämä WFC20 on tällä hetkellä yksi lupaavimmista kehitteillä olevista SOFC-kennoista. Sen nimellisteho on 20 kW ja se tuottaa 750 °C lämpöä. Laite on ollut vuoden 2010 toukokuusta Wallenius Marinen *Undine*-autonkuljetusaluksella koekäytössä, jossa se toimii apukoneena sähkön- ja lämmön tuotannossa. WFC20 pystyy saavuttamaan 80 %:n hyötysuhteen ja laitoksen päästöt koostuvat lähes yksinomaan vesihöyrystä sekä hiilidioksidista, mikä tekee siitä ympäristöystävällisen ratkaisun laivaliikenteen energiantuotannolle. (Marine Propulsion 4–5/2008, 55–56)



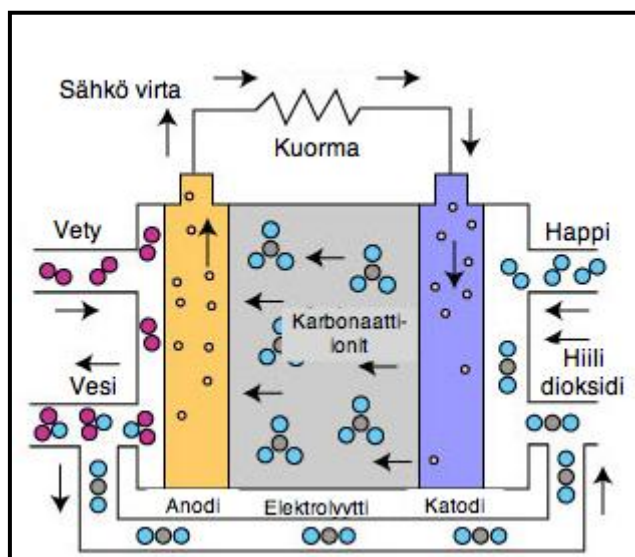
Kuva 19. Kiinteäoksidipolttokennon toimintaperiaate

4.3.2.2 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)

MCFC-kennon toiminta perustuu sen nestemäisenä olevan elektrolyytin kykyyn johtaa karbonaatti-ioneja. Elektrolyytin saavutettua 650 °C:n lämpötilan, sen sisältämät suolat sulavat ja muuttuvat karbonaatti-ioneja johtavaksi. Katodille syötetty hiilidioksidi ja happi osallistuvat reaktioon elektronivirran avulla (23), jolloin syntyneet karbonaatti-ionit alkavat virrata katodilta anodille. Anodilla karbonaatti-ionit reagoivat vedyn kanssa muodostaen vesihöyryä, hiilidioksidia sekä elektroneja (24). Prosessissa syntyneet elektronit ja osa hiilidioksidista johdetaan takaisin katodille, jossa ne osallistuvat uuteen reaktioon. Kuvassa 20 on periaatekuva prosessista. (Nissilä 2010, 26)



Tämän hetken suurimpiin laivakäytössä oleviin polttokennoihin lukeutuu MTU Onsite Energyn kehittämä sulakarbonaattipolttokenno, jonka nimellisteho on 320 kW. Polttokennon testikäyttöä varten valittiin norjalaisen Eidesvik-varustamon alus *Viking Lady*, jossa kenno on toiminut joulukuusta 2009 asti. Polttokenno tukee laivan neljää Wärtsilä 32DF -generaattoria ja käyttää moottorien tavoin maakaasua (LNG) polttoaineena. (Marine Propulsion 10–11/2009, 40)



Kuva 20. Sulakarbonaattipolttokennon toimintaperiaate

Kumpaakin polttokennoa kehitetään jatkuvasti ja suurempitehoisia versioita on odotettavissa. Polttokennoilla saavutettu päästöjen vähennys on huomattava, ja lisäksi ne ovat käytännössä äänettä käyttäviä. Näiden ominaisuuksien puolesta ne sopivat erinomaisesti esimerkiksi sähköntuottajiksi satamiin. Kuitenkin, kuten monessa uudessa tekniikassa, investointikustannukset ovat toistaiseksi melko korkeat.

4.3.3 Stena E-MAXair

Kohoavat polttoainehinnat sekä yleinen painostus ympäristöystävällisempään liikennöintiin on alkanut näkyä myös uudisrakennuksien suunnittelussa. Muun muassa Wallenius Wilhelmsen sekä Wärtsilä kehittävät tahoillaan omia taloudellisia ja ympäristöystävällisempiä ratkaisujaan.

Stena-konsernin laivansuunnitteluosaston Stena Teknikin kehittämässä E-MAXair-konseptissa lähtökohdaksi on otettu aluksen polttoainetaloudellinen toiminta sekä redundanttisuus. MAX-sarjan alukset on suunniteltu matalalle syväydelle, minkä vuoksi ne ovat normaaleja tankkereita leveämpiä. Lisäleveys puolestaan antaa laitteiston sijoittelulle enemmän mahdollisuuksia, joita E-MAXair-mallissa on hyödynnetty muun muassa kahdentamalla potkuriakselit, peräsinkoneet sekä navigointilaitteet. (Marine Propulsion 8-9/2009, 20)

Aluksen polttoaineenkulutusta on pyritty vähentämään uudella rungon muotoilulla, joka vähentää siihen kohdistuvaa veden vastusta. Rungossa on käytössä uuden mallinen bulbi, joka on leveämpi sekä terävämpi kuin konventionaaliset bulbit. Uuden muotoilun ansiosta veden virtaus ohjautuu aluksen alle parantaen sen liukumaa sekä vähentäen veden vastusta. Bulbin lisäksi veden vastusta vähennetään pohjassa olevan ilmapatjan avulla, joka kattaa 25 % pohjan vedenalaisesta pinta-alasta. Patjan avulla veden ja aluksen rungon välinen kitka vähenee ja polttoaineenkulutus laskee noin 10–15 %. Ilmapatjaa ylläpidetään paineilmalla ja pohjan muoto sekä aluksen tasainen trimmi pitävät sen paikoillaan. E-MAXair on myös mahdollista varustaa saksalaisen SkySails-yhtiön kehittämällä tuulipurjeella, joka voi mahdollistaa 6–9 %:n polttoaineesäätöt. Edellä mainituilla tekniikoilla saavutetulla polttoaineenkulutuksen vähentämisellä on suora vaikutus aluksen päästömääriin, etenkin hiilidioksidin osalta.

E-MAXair on suunniteltu pääasiassa Itämeren liikenteeseen ja sen jääluokitus on 1A. Alus on varustettu 5,7 MW:n DF-moottorilla, joka tuottaa maakaasukäytöllä hyvin vähän ilmansaasteita. Aluksen LNG-bunkkerisäiliöt on sijoitettu kannelle, joten ne eivät vie lastitilaa. (Marine Propulsion 8-9/2009, 20)

Polttoaineenkulutuksen pienentämiseksi on kehitetty lukematon määrä eri tekniikoita ja teknologioita. Viimeisimpiin innovaatioihin lukeutuvat muun muassa Hempelin Hempasil X3-pintamaali, jonka polymeerirakenne estää biologisen materiaalin kiinnittymisen aluksen runkoon. Hempel takaa maalinsa vähentävän polttoaineenkulutusta ja ilmoittaa keskiarvoiseksi polttoainesäästöksi 4–8 %. Samaan teknologiaan pohjautuu myös Internationalin Intersleek 900, jossa on lisäksi erittäin alhainen pinnankarheus (n. 75 μ). Pintakäsittelyn lisäksi polttoainekulutukseen vaikuttavat paljon myös aluksen muut hydrodynaamiset ominaisuudet, kuten potkurien muotoilu ja virtausten ohjaus. (Marine Propulsion 10-11/2009, 71–74)

5 PÄÄSTÖMÄÄRÄYKSET JA RAJOITUKSET

Merenkulun päästömääräykset voidaan jakaa kansallisiin sekä kansainvälisiin. IMO:n alainen meriympäristön suojelukomitea asettaa kansainväliset määräykset erillisissä kokouksissa ja ne astuvat voimaan riittävän usean jäsenvaltion ratifioitua ne (15 jäsenvaltiota, joiden kauppalaivasto edustaa vähintään 50 %:a maailman tonnistosta). Kansalliset määräykset voivat olla annettuja asetuksia täydentäviä mutta ei heikentäviä. Määräykset voivat myös koskea tiettyjä maantieteellisiä alueita, kuten etelänapamanteretta, jossa vallitsee poikkeavat säännöt.

5.1 Merellisen ympäristön suojelukomitea (MEPC)

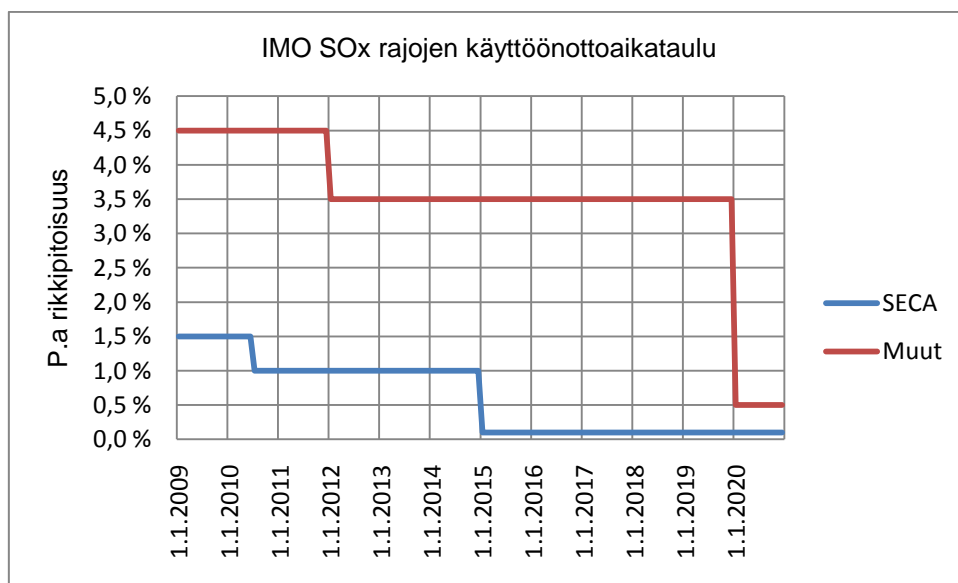
IMO:n meriympäristön suojelukomitea MEPC (Marine Environment Protection Committee) on jäsenvaltioiden edustajista koostuva neuvosto. Komitea kokoontuu 1-2 kertaa vuodessa kehittämään MARPOL-yleissopimusta sekä parantamaan toimia aluksista aiheutuvien päästöjen ehkäisemiseksi. MEPC-kokoontumisissa päätetyt asiat luovutetaan loppuraportin muodossa IMO:n valtuustolle.

Merkittävimpiä MEPC-kokouksia ovat olleet järjestyksessä 57:s sekä 58:s, joissa muun muassa päätettiin tiukentaa polttoaineiden rikki- sekä typpipäästöjä alkaen vuodesta 2010. Viimeaikaiset kokoukset ovat käsitelleet laivaliikenteen kasvihuonekaasujen rajoituksia, laivojen kierrätystä sekä painolastivesien mukana liikkuvia meriorganismeja.

5.2 MARPOL liite VI

MARPOL-yleissopimuksen liite VI käsittelee aluksesta aiheutuvien ilmansaasteiden rajoituksia, ja se otettiin käyttöön vuonna 1997. Rajoitukset koskevat rikin ja typen oksideja, haloneja, CFC-yhdisteitä sekä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, kuten hiilivettyjä. Lokakuussa 2008 otettiin käyttöön liitteen VI uusittu painos, joka sisälsi MEPC 58.-kokouksessa päätetyt rajoitukset alusten pakokaasupäästöihin.

Uudet päästörajoitukset koskevat alusten rikki- ja typpipäästöjä ja ne on määritelty alueittain. Rikkirajoitukset otetaan käyttöön vaiheittain maantieteellisten alueiden mukaan kuvan 21 osoittamalla aikataululla.

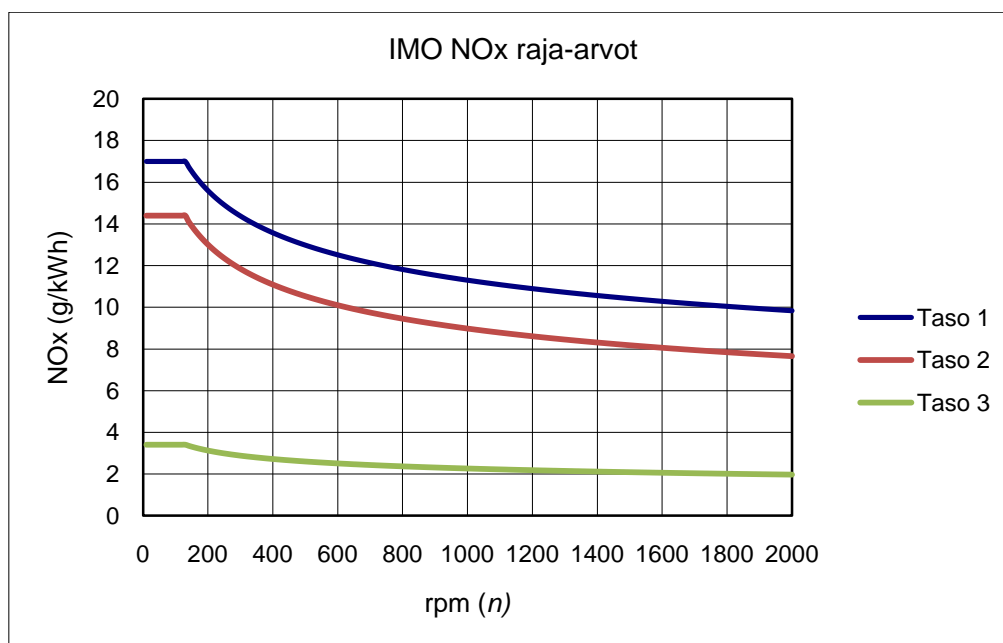


Kuva 21. IMO:n SO_x-päästörajoitusten ajoitus.

Maailmanlaajuisesti		Erityisalueittain (SECA)	
1.1.2012	4,50 % → 3,50 %	1.7.2010	1,50 % → 1,00 %
1.1.2020	3,50 % → 0,50 %	1.1.2015	1,00 % → 0,10 %

Rikkirajoitukset on määritelty polttoaineen maksimirikkipitoisuuden mukaan, sillä normaalikäytössä polttoaineen sisältämä rikki hapettuu lähes kokonaan ja on siis suoraan verrannollinen rikkipitoisuuteen. MARPOLin uudessa painoksessa on kuitenkin sallittu rikkipesurien ja muiden tekniikoiden käyttö edellyttäen, että päästöt vastaavat sallittuja arvoja. Rajoitusten toteutuskelpoisuus arvioidaan viimeistään vuoteen 2018 mennessä.

Uudistuksen myötä myös typenoksidipäästöjen rajoituksia on kiristetty. Aikaisempien rajoitusten lisäksi typenoksidipäästöille asetettiin kaksi uutta tasoa sekä kiristettiin vanhempien moottorien päästöarvoja. Päästöarvot koskevat yli 130 kW:n moottoreita ja ne määräytyvät kierroslukujen mukaan kuvan 22 osoittamalla tavalla. Kuvaajissa käytetyt laskukaavat löytyvät liitteestä 3. (RESOLUTION MEPC.176(58) 2008, 15–21)



Kuva 22. IMO:n NO_x-päästörajoitukset kierrosluvun mukaan

- Tason 1 rajoitukset koskevat 1.1.2000 – 31.12.2010 rakennettuja laivoja sekä 1990-luvulla rakennettuja laivoja, joiden moottoriteho on yli 5000 kW ja sylinteritilavuus vähintään 90 litraa.
- Taso 2 kiristää päästörajoituksia 20 % ja koskee laivoja, jotka on rakennettu 1.1.2011 tai sen jälkeen.

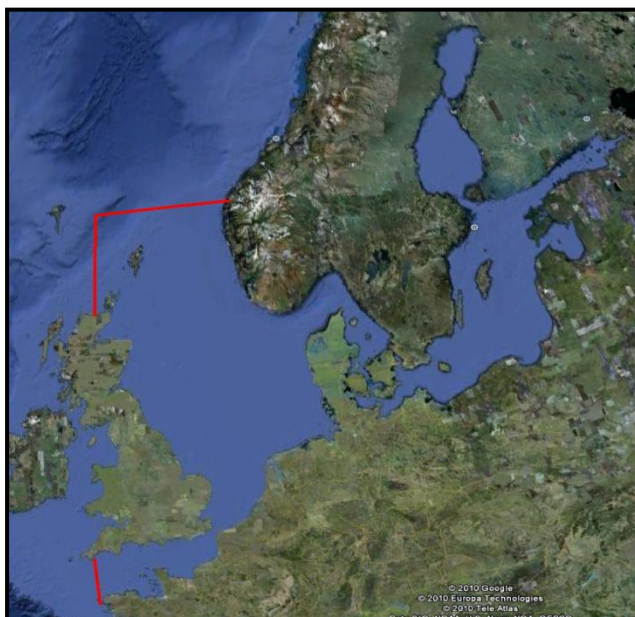
- Tason 3 rajoitukset koskevat aluksia, jotka on rakennettu 1.1.2016 jälkeen ja jotka liikennöivät typen oksidipäästöjen valvonta-alueilla.

5.3 Päästöjen valvonta-alueet (ECA)

Päästöjen valvonta-alueet eli ECA:t (Emission Control Area) ovat maantieteellisesti määriteltäviä alueita, joilla liikkuvia aluksia koskee normaalista poikkeavat päästövaatimukset. Alueita on toistaiseksi vain Itä- ja Pohjanmerellä, mutta muun muassa Yhdysvallat sekä Kanada ovat ehdottaneet omia alueitaan. Päästöjen valvonta-alueet voidaan jakaa pääasiassa kahteen tyyppiin tai näiden yhdistelmiin.

5.3.1 Rikin oksidipäästöjen päästöjen valvonta-alue (SECA)

Pohjanmerelle sekä Itämerelle rajoittuva SECA-alue (Sulphur Emission Control Area) asettaa rajoituksia alueella liikkuvista aluksista aiheutuville rikkipäästöille, MARPOLin liitteen VI mukaisesti. Itämeri asetettiin EU:n päätöksellä SECA-alueeksi 19.5.2006 ja Pohjanmeri 11.8.2007. Alue rajoittuu Ison-Britannian etelä- ja pohjoiskärkiin ja näkyy kuvassa 23 punaisella viivalla. Aluetta ei toistaiseksi koske typenoksidien erityisrajoitukset. (MARPOL 2006, 343)

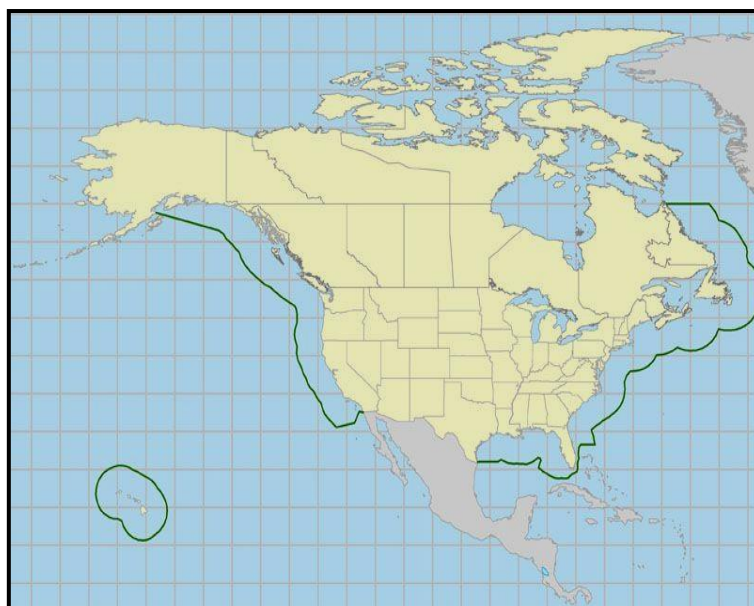


Kuva 23. SECA-alueen rajaviiva pohjoisessa W 4° 380 km N 62° 450 km ja etelässä W 5° 150 km

5.3.2 Typen oksidipäästöjen valvonta-alue (NECA)

MARPOLin liitteessä VI määritelty typenoksidipäästöjen taso 3 koskee vain erikseen määriteltyjä NECA-alueita (NO_x Emission Control Area). Työn kirjoitushetkellä yksinomaan NECA-alueita ei vielä ole määritelty, joskin Pohjois-Amerikan ja Kanadan rannikolle suunniteltu ECA tulee sisältämään kummatkin päästöalueet.

Kuvassa 23 näkyvä rajaviiva määrittelee Pohjois-Amerikan ja Kanadan tulevan ECA-alueen, joka otetaan käyttöön vuonna 2012. Voimaantulon jälkeen alueella liikkuvien alusten rikkipäästörajat vastaavat SECA-rajoituksia ja vuoden 2016 jälkeen NO_x-päästöt tason 3 raja-arvoja. Lisäksi alueella otetaan käyttöön pienhiukkas-päästörajoituksia, joilla arvioidaan saavutettavan 90 000 tonnin vähennykset PM2.5 päästöihin. (United States Environmental Protection Agency)



Kuva 23. Pohjois-Amerikan ja Kanadan suunniteltu ECA-alue, joka sisältää sekä rikki- että typipäästörajoitukset.

Myös Itämeren alueelle on suunnitteilla NECA-rajoituksia. Uusia rajoituksia on tarkoitus HELCOMin mukaan ehdottaa MEPC 62. kokouksessa heinäkuussa 2011.

5.4 Direktiivi 2005/33/EC

Vuoden 2010 alusta on EU:n alueella toimeenpantu direktiiviä 2005/33/EC, joka velvoittaa satamissa ja sisävesillä olevia aluksia käyttämään 0,1 % rikkiä sisältävää polttoainetta tai vastaavia savukaasujen puhdistusmenetelmiä. Määräys ei koske aluksia, jotka viettävät satamassa alle 2 tuntia, tai aluksia, jotka satamassa ollessaan sammuttavat koneensa ja käyttävät maasähköä. Tämä direktiivi tiukentaa aikaisemman 1999/32/EC-direktiivin päästömääräyksiä. (Neuvoston direktiivit 1999/32/EY, 2005/33/EY)

5.5 Helsingin sopimus

Itämeren alueen merellisen ympäristön suojelusopimus eli Helsingin sopimus on Itämeren valtioiden sekä Euroopan unionin allekirjoittama sopimus, jolla pyritään vähentämään Itämeren kuormitusta valuma-alueilta sekä mereltä. Ensimmäinen sopimus allekirjoitettiin vuonna 1974 ja se astui voimaan vuonna 1980. Viimeisin sopimus on allekirjoitettu 1992 ja astui voimaan vuonna 2000. Helsingin sopimuksen täytäntöönpanoa valvoo Helsingin komissio (HELCOM). Komissio kokoontuu vuosittain käsittelemään Itämeren ympäristönsuojeluongelmia ja laatimaan tarvittaessa uusia ehdotuksia suojelun edistämiseksi. Merkittävimpiä HELCOMin saavutuksia on Itämeren muuttaminen SECA-alueeksi sekä alusten käymäläjätevesien päästömääräysten laajentaminen koskemaan myös huviveneitä. (Helcom, web-sivusto)

5.6 Kalifornia

Muista Pohjois-Amerikan osavaltioista poiketen Kalifornia on asettanut omat päästörajoitukset aluevesilleen. Vuonna 2009 uudistetuissa määräyksissä Kalifornian vesille saapuvan aluksen rikkipäästöjen tulee käytettävästä polttoaineesta riippuen olla taulukon 3 mukaiset. Päästörajoitusalue ulottuu 24 merimailia Kalifornian rannikolta, ja saapuvien alusten on tarvittaessa pystyttävä todistamaan polttoainevaihdon kellonaika ja paikka

Taulukko 3. Kalifornian aluevesien päästörajoitukset

PVM	MGO	MDO
1.7.2009 alkaen	1,5 %	0,5 %
1.7.2012 alkaen	0,1 %	0,1 %

Koska Pohjois-Amerikka on sitoutunut vuoden 2012 alusta noudattamaan IMO:n SECA-rajoituksia, harmonisoidaan myös Kalifornian rajoitukset tuolloin muun maan mukaan. (California Air Resources Board 2009, 2)

5.7 Antarktis

Antarktis on luokiteltu MARPOLin mukaan erityisalueeksi, jossa aluksista aiheutuvi- en jätteiden laskeminen mereen on kiellettyä. Vuoden 2006 MEPC-kokouksessa ehdotettiin myös raskaan polttoöljyn täyskieltoa aluksilla, jotka liikennöivät Antarktiksella. Ehdotus tulee todennäköisesti voimaan lähivuosina ja sen perusteena on jäävuorien ja irtojään aiheuttamien öljyvuotojen ympäristövaikutuksien minimoiminen. (ASOC Press Briefing 2009)

6 YHTEENVETO

Merenkulkuala elää murrosvaihetta. Kaikkialla maailmassa ollaan tiukentamassa päästörajoituksia, joiden saavuttamiseksi joudutaan investoimaan uuteen tekniikkaan niin maalla kuin merelläkin. Tämä ei kuitenkaan välttämättä ole huono asia, sillä uusi tekniikka tuo mukanaan myös uusia mahdollisuuksia. Näistä mainittakoon ilmeinen terveyshyöty sekä laivaliikenteen polttoainetehokkaampi toiminta.

IMO:n alkuperäinen suunnitelma laivaliikenteen rikin oksidipäästöjen pienentämiselle oli rajoittaa polttoaineen rikki- ja hiilipitoisuutta. Pian kuitenkin huomattiin, että riittävän polttoainemäärän jalostaminen koko maailman laivaliikenteen tarpeisiin vaaditussa aikataulussa ei ole käytännössä mahdollista. Uusimmassa MARPOLin liitteessä tähän ongelmaan on paneuduttu sallimalla aluksille rikinpuhdistuslaitteistojen käyttö edellyttäen, että laitteisto on sertifioitu ja sen toiminta voidaan tarvittaessa todistaa.

Yhdistelemällä eri puhdistustekniikoita voidaan päästä hyvin alhaisiin päästöarvoihin. Moottoriteknisillä menetelmillä voidaan saavuttaa huomattavia päästövähennyksiä, mutta tiukimpia rajoituksia varten joudutaan panostamaan myös pakokaasujen puhdistukseen. Itä- ja Pohjanmeren SECA-alueiden sekä MARPOLin uusien päästörajoitusten vuoksi muun muassa Suomen merenkulku joutuu investoimaan tehokkaampaan puhdistustekniikkaan normaalia aikaisemmin. Muuta maailmaa tiukemmat päästörajoitukset ovat aiheuttaneet keskustelua merikuljetusten kustannuksista, sillä Itämeren liikenne joutuu nyt epäedulliseen asemaan muun maailman merikuljetusten kanssa. Oletettavissa on kuitenkin, että päästörajoitusalueet lisääntyvät tulevaisuudessa, jolloin Suomen kauppalaivasto on jo valmiudessa ja kykenee toimimaan alueilla ilman suuria muutoksia. Keskustelua on jo käyty Välimeren, Mustanmeren ja Japanin liittämistä SECAan.

Uusien tekniikoiden kehittäminen ei perustu vain ympäristökysymyksiin, vaan osasyynä on myös maailman polttoainevarantojen loppuminen. Raakaöljyn hinnanousu heijastuu myös laivaliikenteen toimintakuluihin, ja ongelmaan pyritään kehittämään ratkaisua muun muassa biopolttoaineilla. Biopolttoaineiden kehitys on Suomessa huipputasoa ja työn kirjoitushetkellä keskitytään jo pääosin toisen sukupolven biopolttoaineisiin. Koska biopolttoaineet eivät suoranaisesti koske opinnäytetyön aiheita, on niitä tarkasteltu tässä työssä vain pintapuolisesti.

Tarkasteltaessa muun muassa voimalaitosten ilmansaasteiden puhdistustekniikan kehitystä voidaan tehdä joitakin oletuksia myös merenkulun päästörajoitusten tulevaisuudesta. Ihmisille ja eläimille haitallisten pienhiukkasten määrää on voimalaitoksissa vähennetty erinäisten suodattimien avulla. Toistaiseksi suodattimet ovat laivakäytössä epäkäytännöllisiä suuren kokonsa vuoksi, mutta oletettavissa on, että varsinkin satamissa ja ihmisasutusten lähellä liikennöiville aluksille asetetaan pienhiukkasrajoituksia. Toinen päästörajoitusten kohde tulee todennäköisesti koskemaan kasvihuonekaasuja, etenkin hiilidioksidia. Joissakin voimalaitoksissa on käytössä CCS-tekniikkaa, jolla tuotettu hiilidioksidi nesteytetään ja varastoidaan maahan. Tässäkin tapauksessa saman tekniikan käyttöönotto on ongelmallista. CO₂-vähennyksiä varten on viimeisimmissä MEPC-kokouksissa pohdittu yhtenäistä EEOI-järjestelmää, joka käytännössä tarkoittaa laivojen nopeuden alentamista. Tulevaisuudessa voi tosin olla mahdollis-

ta muuttaa hiilidioksidi haitattomaan muotoon, mutta tällä hetkellä kyseisen tekniikan hyödyntäminen on vielä teoreettisella pohjalla.

Tietoa eri tekniikoista on saatavilla valtavasti eri julkaisuista. Työssä on käytetty alan julkaisuja sekä etsitty tietoa Internetin avulla. Kaikkea saatavilla olevaa tietoa ei kuitenkaan ole käytännöllistä pyrkiä saamaan samoihin kansiin, ja joitakin asioita, kuten turboahdintekniikoiden vaikutuksia, on tarkoituksellisesti jätetty työstä pois. Suuri osa työssä esitettyjen tekniikoiden teknisistä tiedoista on suoraan valmistajan omista julkaisuista. Toisinaan julkaisujen välillä saattoi havaita pieniä eroavaisuuksia tiedoissa, joten työhön merkityt arvot ovat suuntaa antavia, keskiarvoja saaduista tiedoista.

LÄHTEET

ACERT diesel engines webartikkeli. (Viitattu 16.5.2010). Saatavissa:

http://www.cat.com/cda/files/265671/7/Equipment_World_Reprint_%28AEDQ0012%29.pdf

ADP Power ApS. 2005. Reduced NO_x & Improved Performance using CWI – Air Humidification. (Viitattu 26.4.2010). Saatavissa:

http://adbpower.dk/CWI_PaperRev0_05-09-01.pdf

Andreola, M. 2007. Dual-fuel-electric LNG machinery: when a concept becomes reality. In detail, Nro 2/2007. (Viitattu 23.4.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/2_2007/dual-fuel-electric-lng-carrier-machinery.pdf

ASOC Press Briefing. 2009. IMO to Consider Ban on Heavy Fuel Oil in Antarctic Waters (Viitattu 21.9.2010). Saatavissa:

<http://www.asoc.org/Portals/0/ASOC%20heavy%20fuel%20oil%20ban%20briefing062409.pdf>

California Air Resources Board 2009. Marine Notice 2009-2. Saatavissa:

http://www.arb.ca.gov/ports/marinevess/documents/marinenote2009_2.pdf

Couple Systems. Maritime Emissions Reduction. 2009. (Viitattu 21.6.2010) Saatavissa: <http://www.couple-systems.com/>

CSNO_x-esite. Ecospec. (Viitattu 6.7.2010). Saatavissa:

http://www.ecospec.com/pdf/CSNOx_Brochure.pdf

Ecospec tiedote 25.2.2010. Excellent verified results of CSNO_x by ABS on 11MW main engine, a world's first. (Viitattu 6.7.2010). Saatavissa:

<http://www.ecospec.com/pdf/25Feb10.pdf>

Haga, N. 2006. Liquid biofuel – a viable choice for power generation. Twentyfour7, Nro 1/2006. (Viitattu 10.2.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/twentyfour7/Liquidbiofuel.pdf

Heim, K., Brown, D. 2009. State-of-the-Art Common-Rail Technology in Low-Speed Marine Diesel Engines. Wärtsilä. (Viitattu 14.5.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/technical_papers/RT-flex_StateOfArtTech.pdf

Helcom, web-sivusto. (Viitattu 20.9.2010). Saatavilla:

http://www.helcom.fi/helcom/en_GB/aboutus/

Hellén, G., 2003. Guide to diesel exhaust emissions control. Marine News, Nro. 2/2003.

Hellén, G., 2007 a. Wärtsilä R&D is responding to increasing concern about particulate emissions. In detail, Nro 1/2007. (Viitattu 15.4.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/1_2007/wartsila_RD.pdf

Hellén, G., 2007 b. Marine Emission Control Technologies by Wärtsilä. Wärtsilä Green Solutions Seminar, Gothenburg 26.9.2007. (Viitattu 27.5.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/sweden/docs/locals/sweden/press/env_seminar_2007/NOx_reduction_techniques.pdf

Henriksson, T., SOx scrubbing of marine exhaust gases. In detail, Nro 1/2008. (Viitattu 20.6.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/2_2007/SOx-scrubbing-marine-exhaust-gases.pdf

Huhtinen, M., Hokkanen, R., Arvila, P., Conessen, E., Käyhty, E. & Muuri, M. 1998. Laivadieselin päästöjä vähentävien puhdistuslaitteiden tuotteistaminen. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Häkkinen, P. 1993. Laivan Koneistot. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.

Hämälä, S., Laine, J. & Vesa, P. 1992. Ilmansuojelutekniikka. Jyväskylä: Tammertekniikka.

Ilmanlaatuportaali. Typpidioksidi. (Viitattu 1.4.2010). Saatavissa:

<http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/komponentit/no2.html>

Ilmatieteen laitos a. Otsonia syntyy troposfäärin valokemiallisissa reaktioissa. (Viitattu 1.4.2010). Saatavissa: http://www.fmi.fi/tutkimus_otsoni/otsoni_32.html

Ilmatieteen laitos b. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. (Viitattu 1.5.2010). Saatavissa:

http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/miksi_6.html

IMO Inert Gas Systems 1990 Edition. 1998. UK: INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION.

Kalli, J., Karvonen, T., Makkonen, T. 2009. Laivapolttoaineen rikki- ja hiilipitoisuus vuonna 2015. Selvitys IMO:n uusien määräysten vaikutuksesta kuljetuskustannuksiin. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriö.

Kulmala, M., Hienola, J., Hämeri, K., Pirjola, L. & Vesala, T. 2008. Fysiikka, kemia ja ympäristöongelmat. Helsinki: Aerosolitutkimusseura ry. (Viitattu 21.6.2010). Saatavissa:

http://www.lvm.fi/c/document_library/get_file?folderId=339549&name=DLFE-7317.pdf&title=Julkaisuja%2020-2009

Laukkanen, T. 1998. Ympäristötietoisuus 1. Helsinki: Timo Laukkanen ja Opetushallitus.

Levander, O. 2008. LNG auxiliary power in port for container vessels. In detail, Nro. 2/2008. (Viitattu 12.2.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/in_detail/2_2008/Ing-auxiliary-power-container-vessels.pdf

Marine Propulsion 4-5/2008. Countdown to seagoing debuts for fuel cells. 55–56.

Marine Propulsion 10-11/2009. Determining fuel savings from antifouling coatings. 71–74.

Marine Propulsion. 2-3/2010. IMO meeting take up CO2 challenge, 15–16.

MARPOL, Consolidated edition 2006. Beccles, UK: INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. ISBN 92-801-4216-x

The Motorship. 31.12.2009. Successful marine trial for dry scrubber. Web-artikkeli. (Viitattu 7.7.2010). Saatavissa:

<http://www.motorship.com/features/fuels-and-oils/successful-marine-trial-for-dry-scrubber>

NEUVOSTON DIREKTIIVI 1999/32/EY, tiettyjen nestemäisten polttoaineiden rikkipitoisuuden vähentämisestä ja direktiivin 93/12/ETY muuttamisesta. (Viitattu 20.9.2010). Saatavissa:

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:121:0013:0018:FI:PDF>

NEUVOSTON DIREKTIIVI 2005/33/EY, direktiivin 1999/32/EY muuttamisesta meriliikenteessä käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuuden osalta. (Viitattu 20.9.2010). Saatavissa:

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0059:0069:FI:PDF>

News from MAN B&W. 2002. Considerable Emission Reductions and Improved Operation with Slide Fuel Valves. (Viitattu 23.4.2010). Saatavissa:

http://mandiesel-greentechnology.com/files/news/files_of737/Slide%20Fuel%20Valves%20190802.pdf

Nissilä, M. 2010. Vetytalous ja polttokennot. Kandidaatintyön luonnos. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. (Viitattu 7.9.2010). Saatavissa:

https://webhotel2.tut.fi/units/msg/tp/opinnot/kandityot_k10/matti_nissila.pdf

Ohlström, M. 1998. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt Suomessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). (Viitattu 14.4.2010). Saatavissa:

<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1998/T1934.pdf>

Pakarinen, R. Nothing Common About Common Rail. Twentyfour7, Nro 2/2007. (Viitattu 21.4.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/twentyfour7/2_2007/common_rail_nothing_common.pdf

Paro, D. Wärtsilä. Technical improvements for ships. The Haagen-Smit Symposium 18.4.2005. (Viitattu 27.5.2010). Saatavissa:

<http://westcoastcollaborative.org/files/sector-marine/Haagen-Smit%20Symposium%20Technical%20Improvements%20for%20Ships2.pdf>

Raiko, R., Kurki-Suonio, I., Saastamoinen, J. 1995. Poltto ja palaminen. Jyväskylä: Teknisten Tieteiden Akatemia (TTA).

Raiko, R., Lehtinen, M. 2002. Moottoritekniikan teknologiaohjelma ProMOTOR 1999–2003. Teknologiaohjelmaraportti 2/2004. Helsinki: Tekes. (Viitattu 11.5.2010).

Saatavissa: http://www.tekes.fi/fi/document/43277/promotor_pdf

RESOLUTION MEPC.176(58). 2008. Revised MARPOL Annex VI. (Viitattu 20.9.2010). Saatavissa:

http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D23760/176%2858%29.pdf

Seppänen, H. 1991. Ympäristösuojelutekniikan perusteet. Helsinki: Tekijä ja Otatieto Oy

Stenger, W. 2009. New Wave Biofuels. Twentyfour7, Nro. 3/2009. (Viitattu 25.3.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/about_us/twentyfour7/3-2009/new-wave-biofuels.pdf

United States Environmental Protection Agency. 2010. Designation of North American Emission Control Area to Reduce Emissions from Ships. (Viitattu 20.9.2010). Saatavissa: <http://www.epa.gov/otaq/regs/nonroad/marine/ci/420f10015.pdf>

Valčić, M. THE LEARNING RESOURCE FOR MARINE ENGINEERS. Warsash Maritime Academy. Webaineisto. (Viitattu 26.5.2010). Saatavissa:

<http://www.fpp.edu/~perkovic/MAGISTRSKI/Kogeneracija/27517784-Marine-Diesels-Co-Uk.pdf>

Woodyard, D. 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Oxford, UK: Butterworth Heinemann.

Woodyard, D. 2002. Shipping must go greener. Marine Propulsion, Nro 6-7/2009. ISSN: 1742-2825

World Nuclear Association. Nuclear-Powered Ships. Internet tiedote. 2010. (Viitattu 7.7.2010). Saatavissa: <http://www.world-nuclear.org/info/inf34.html>

Wright, A.A. 2000. Exhaust Emissions from Combustion Machinery. London, UK: Institute of Marine Engineers.

Wärtsilä 46 technology review. 2005. (Viitattu 27.5.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/turkey/docs/en/power/media_publications/brochures/engines/w46_tr.pdf

Wärtsilä 50DF technology review. 2007. (Viitattu 23.4.2010). Saatavissa:

http://www.wartsila.com/Wartsila/global/docs/en/ship_power/media_publications/brochures/product/engines/medium_speed/wartsila_50DF_engine_technology.pdf

LIITE 1

Pykälä 21 i valtioneuvoston asetuksessa aluksista aiheutuvan ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi:

Aluksen jätteenpoltouunin on oltava Marpol 73/78 -yleissopimuksen VI liitteen vaatimusten mukainen.

Seuraavien aineiden poltto on kielletty Suomen talousvyöhykkeellä ja suomalaisella aluksella myös Suomen aluevesien ja talousvyöhykkeen ulkopuolella:

1) Marpol 73/78 -yleissopimuksen I, II ja III liitteessä mainittujen lastien jätteet ja niihin liittyvät saastuneet pakkausmateriaalit;

2) polyklooratut bifenyylit (PCB:t);

3) Marpol 73/78 -yleissopimuksen V liitteessä määritellyt jätteet, jotka sisältävät raskasmetalleja enemmän kuin vain jälkiä niistä; ja

4) öljytuotteet, jotka sisältävät halogeeniyhdisteitä.

LIITE 2

Pykälä 21 c valtioneuvoston asetuksessa aluksista aiheutuvan ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi:

Aluksella käytettävän polttoöljyn rikki- ja raskasmetallipitoisuus ei saa ylittää 4,5 painoprosenttia.

Aluksella käytettävän polttoöljyn on lisäksi täytettävä Marpol 73/78 -yleissopimuksen VI -liitteen mukaiset vaatimukset.

Suomalaisen aluksen purjehtiessa Itämeren alueella ja muilla Marpol 73/78 -yleissopimuksen VI liitteessä tarkoitetuilla rikin oksidipäästöjen valvonta-alueilla sekä ulkomaisen aluksen purjehtiessa Itämerellä Suomen vesialueella tai talousvyöhykkeellä:

1) aluksella käytettävän polttoöljyn rikki- ja raskasmetallipitoisuus saa olla enintään 1,5 painoprosenttia; tai

2) aluksella on käytettävä sellaista pakokaasujen puhdistusjärjestelmää, jolla aluksen rikin oksidipäästöt, mukaan lukien sekä apu- että pääkoneiden aiheuttamat rikin oksidipäästöt, ovat yhteensä enintään 6,0 g SO_x/kWh rikkidioksidiksi (SO₂) laskettuna; taikka

3) aluksella on käytettävä muuta hyväksyttyä teknistä menetelmää, jonka voidaan osoittaa vähentävän rikin oksidipäästöt tasolle 6,0 g SO_x/kWh tai sen alle.

Suomen lipun alla purjehtivassa aluksessa pakokaasujen puhdistusjärjestelmää tai muuta teknistä menetelmää käytettäessä aluksen päästöjä on seurattava jatkuvien mittauksin.

LIITE 3

Taso 1

1. 17.0 g/kWh kun n on vähemmän kuin 130 rpm
2. $45 * n^{-0.2} g/kWh$ kun n on välillä 130 ja 2000 rpm
3. 9.8 g/kWh kun n on 2000 rpm tai yli

Taso 2

1. 17.4 g/kWh kun n on vähemmän kuin 130 rpm
2. $44 * n^{-0.2} g/kWh$ kun n on välillä 130 ja 2000 rpm
3. 7.7 g/kWh kun n on 2000 rpm tai yli

Taso 3

1. 3.4 g/kWh kun n on vähemmän kuin 130 rpm
2. $9 * n^{-0.2} g/kWh$ kun n on välillä 130 ja 2000 rpm
3. 2.0 g/kWh kun n on 2000 rpm tai yli