



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Joonas Hurskainen

Euro VI -päästönormien soveltaminen expedition- risteilijään

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomi-insinöörin tutkinto
Energiatekniikka

Vaasa 2020

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Joonas Hurskainen	
Tutkielman nimi:	Euro VI -päästönormien soveltaminen expedition-risteilijään	
Tutkinto:	Diplomi-insinöörin tutkinto	
Oppiaine:	Energiatekniikka	
Työn ohjaajat:	Tommi Heikkilä, Kirsi Spoof-Tuomi	
Työn valvoja:	Seppo Niemi	
Valmistumisvuosi:	2021	Sivumäärä: 76

TIIVISTELMÄ:

Dieselmootoreiden haitalliset päästöt koostuvat pääosin pienhiukkas- (PM), typenoksidi- (NOx), hiilivety- (HC), hiilimonoksidi- (CO) ja rikkioksidipäästöistä (SOx). Arktinen alue on erityisen herkkä haitallisille päästöille, kuten pienhiukkaspäästöille. Osa merenkulusta peräisin olevista pienhiukkaspäästöistä koostuu mustasta hiilestä, jolla on jäätiköitä sulattava vaikutus.

Tämä diplomityö on toteutettu meriteknologiaan ja laivanrakennukseen erikoistuneelle Helsinki Shipyardsille. Työn tavoitteena oli tutkia, miten erittäin tiukat päästörajat sisältävä hyötöajoneuvojen Euro VI -päästönormi voidaan saavuttaa arktisilla alueilla liikkuvassa expedition-risteilijässä. Edeltävästi ongelmiksi tiedettiin vähäinen käytettävissä oleva tila pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmille sekä jälkikäsittelyjärjestelmien tuottama korkea vastapaine.

Työ koostuu kirjallisuuskatsauksesta, jossa esitellään IMO:n päästömääräykset ja Euro VI -päästönormit. Lisäksi tutkitaan vaihtoehtoisten polttoaineiden päästöarvoja ja verrataan tavoitepäästöihin. Lopuksi kartoitetaan erilaisia dieselmootoreiden jälkikäsittelyjärjestelmiä ja niiden käytön tuomia haasteita. Erityisesti tarkastellaan vastapaineen vaikutuksia suunnitteluun, polttoaineen kulutukseen ja päästöihin. Työn empiirisessä osassa tutkittiin eri valmistajien ehdottamia ratkaisuja päästönormin saavuttamiseksi. Tehokkaimmiksi osoittautuivat hiukkassuodatin (DPF) ja typenoksideja pelkistävä katalysaattori (SCR). Tutkimuksen tuloksena laadittiin layout-piirroksat, joissa esitetään DPF- ja SCR-komponenttien järjestys ja niiden tarvitsema tila. Jälkikäsittelykomponenteilla saavutettavasta äänenvaimennuksesta ei saatu riittävästi tietoa, jotta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä siitä, voidaanko äänenvaimennin jättää pois järjestelmästä.

AVAINSANAT: Arktinen merenkulku, Euro VI -päästönormit, pakokaasujen jälkikäsittely, vaihtoehtoiset polttoaineet, meriteollisuus

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author: Joonas Hurskainen
Title of the Thesis: Application of Euro VI emission standards to an expedition cruiser
Degree: Master of Science in Technology
Programme: Energy Technology
Supervisors: Tommi Heikkilä, Kirsi Spoof-Tuomi, Seppo Niemi
Year: 2021 **Pages:** 76

ABSTRACT:

Harmful emissions from diesel engines consist mainly of particulate matter (PM), nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO) and sulfur oxides (SO_x). The Arctic region is particularly sensitive to harmful emissions, such as fine particulate emissions. Part of the particulate emissions from shipping consist of black carbon, which accelerates ice melting in the Arctic.

This thesis was done for Helsinki Shipyard, which specializes in marine technology and shipbuilding. The objective of the work was to investigate how the Euro VI emission standard for commercial vehicles with very strict emission limits can be achieved on an expedition cruiser operating in the Arctic region. The limited space available for exhaust after-treatment systems and the high back-pressure produced by the after-treatment systems were previously known to be problems.

The work consists of a literature review presenting the IMO emission regulations and Euro VI emission standards. In addition, the emission values of alternative fuels are studied and compared with target emissions. Finally, the various after-treatment systems for diesel engines and the challenges posed by their use are presented. In particular, the effects of back-pressure on design, fuel consumption and emissions are examined. The empirical section of the work examined the solutions proposed by different manufacturers to achieve the emission standard. A particulate filter (DPF) and the selective catalytic reduction (SCR) of NO_x proved to be the most effective. As a result of the study, layout drawings were prepared, showing the order of the DPF and SCR components and the space required for them. Not enough information was obtained on the noise attenuation properties of the after-treatment components to draw conclusions as to whether the silencer could be excluded from the system.

KEYWORDS: Arctic shipping, Euro VI emission standards, exhaust after-treatment, alternative fuels, marine industry

Sisälllys

1	Johdanto	9
2	Dieselmootoreiden päästöt	12
2.1	Typpioksidit	13
2.2	Hiukkaspäästöt	13
2.3	Dieselmootorin NO _x -PM Trade-Off	16
2.4	Muut kaasumaiset päästöt	16
2.4.1	Rikin oksidit	16
2.4.2	Hiilivedyt	17
2.4.3	Hiilimonoksidi	17
3	Päästörajoitukset	19
3.1	IMO NO _x -päästörajat	19
3.2	Polttoaineiden rikkipitoisuus ja hiukkaspäästöt	21
3.3	IMO tulevaisuus	22
3.4	Euro VI	23
3.5	IMO-päästörajat vs. Euro VI	24
4	Päästöarvot eri polttoaineilla	25
4.1	Polttoaineiden ominaisuuksien vaikutus päästöihin	25
4.2	ULSFO	27
4.3	LNG	29
4.4	Vetykäsitelty kasviöljy (HVO)	32
4.5	Polttoaineen ja voiteluöljyn vaikutus jälkikäsittelykomponentteihin	34
4.6	Yhteenveto	35
5	Pakokaasujen jälkikäsittely	36
5.1	Hiukkassuodatin	36
5.1.1	Regenerointi	37
5.1.2	DPF ja tuhka	39
5.2	SCR-katalysaattori	40

5.3	DPF:n ja SCR:n soveltaminen merikäyttöön	43
5.4	EGR	46
5.5	Vastapaine	47
6	Jälkikäsittelyjärjestelmä expedition-risteilijään	51
6.1	Kokonaisratkaisut	51
6.1.1	Valmistajan 1 tarjoama vaihtoehto	52
6.1.2	Valmistajan 2 tarjoama vaihtoehto	54
6.1.3	Tilankäyttö ja vastapaine	56
6.2	Layout	57
6.2.1	Valmistajan 2 komponentit	58
6.2.2	Valmistajan 1 komponentit	61
7	Johtopäätökset	63
8	Yhteenvedo	65
	Lähteet	67
	Liitteet	76
	Liite 1. HFO ja RMB 30 polttoaineiden ominaisuudet	76

Kuvat

Kuva 1.	Dieselmoottorien päästöjen koostumus.	12
Kuva 2.	Polttomoottorin hiukkasten kokojakauma esitettynä massana ja lukumääränä.	15
Kuva 3.	Hiukkasten koostumus eri kuormituksilla käytettäessä LFO.	16
Kuva 4.	Nykyiset NO _x ECA alueet (sinisellä merkityt) ja vuodesta 2021 eteenpäin (vihreällä merkityt).	20
Kuva 5.	NO _x -päästöjen vähentämistekniikat.	21
Kuva 6.	Polttoaineen rikkipitoisuus rajat maailmanlaajuisesti ja SO _x ECA -alueilla.	22
Kuva 7.	Polttoaineen rikkipitoisuuden ja PM-päästöjen yhteys.	26
Kuva 8.	HFO (mustat neliöt) ja ULSFO (harmaat kolmiot) PM-päästöt eri kuormituksilla. Täytetyt merkit kuvaavat kokonaishiukkaspäästöjä ja avoimet merkit kuvaavat kiinteitä hiukkaspäästöjä.	29
Kuva 9.	PM- (ympyrät) ja PN-päästöt (neliöt) MDO-, MGO- ja NG-käytössä.	30
Kuva 10.	LNG:n ja dieselpolttoaineen hiukkaspäästöjen koostumus ja arvot.	31
Kuva 11.	HVO ja EN 590-30 päästöt verrattuna EN 590.	33
Kuva 12.	NO _x -päästöt MGO ja HVO.	34
Kuva 13.	PM-päästöt MGO ja HVO.	34
Kuva 14.	Keraamisen täysvirtaussuodattimen toiminta	37
Kuva 15.	Tuhkan kertyminen DPF-kanavaan.	40
Kuva 16.	Kuvaus SCR-katalysaattorin kemiallisesta prosessista.	41
Kuva 17.	SCR-järjestelmä pystysuunnassa.	42
Kuva 18.	SCR-järjestelmä vaakasuunnassa.	43
Kuva 19.	Vaihtoehtoisia asetteluja SCR- ja DPF-komponenteille.	43
Kuva 20.	DPF ja SCR layout merellä liikkuvassa aluksessa.	45
Kuva 21.	DPF ja SCR layout testiolosuhteissa. Polttimella ylläpidetään haluttua pakokaasun lämpötilaa.	45
Kuva 22.	SCR:n NO _x -vähennystehokkuus ilman hiukkassuodatinta ja suodattimen kanssa.	46

Kuva 23.	EGR-suhteen vaikutus PM- ja NO _x -päästöihin	47
Kuva 24.	Kasvavan vastapaineen vaikutus ilman ja polttoaineen suhteeseen, maksimisylinteripaineeseen, polttoaineen kulutukseen ja pakokaasun lämpötilaan ennen turbiinia.	48
Kuva 25.	Vastapaineen kompensointi turbon uudelleen sovituksella ja moottorin ruiskutus- ja pakoventtiilien ajoitusta muokkaamalla.	49
Kuva 26.	Pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmä, jossa vastapainetta kompensoidaan pakokaasutuulettimella.	50
Kuva 27.	DPF:n (oranssi) ja SCR:n (sininen) tilavuus moottoritehon funktiona.	56
Kuva 28.	Komponenttien järjestys pakokaasujärjestelmässä.	57
Kuva 29.	Dieselsähköisen koneiston sijainti konehuoneissa 1. kannella.	58
Kuva 30.	DPF-komponentit sijoitettuna 2. kannelle.	59
Kuva 31.	SCR-reaktorit sijoitettuna kuiluun.	60
Kuva 32.	Poikkileikkaus risteilijästä	60
Kuva 33.	Valmistajan 1 moottorit sijoitettuna 1. kannelle.	61
Kuva 34.	DPF-komponentit 2. kannella.	62
Kuva 35.	Komponentit sijoitettu porrastetusti kuiluun.	62

Taulukot

Taulukko 1.	Tier I-III -rajat.	19
Taulukko 2.	Euro VI-päästörajoitukset.	23
Taulukko 3.	Yhteenveto IMO- ja Euro VI-päästörajoituksista.	24
Taulukko 4.	Polttoaineiden ominaisuuksien vaikutukset päästöihin.	26
Taulukko 5.	Kaasumaiset päästöt HFO ja RMB30 polttoaineilla.	28
Taulukko 6.	Polttoaineiden päästöarvot.	35
Taulukko 7.	Valmistajan 1 moottorin tärkeimmät tekniset tiedot.	52
Taulukko 8.	Valmistajan 1 DPF tiedot.	53
Taulukko 9.	Valmistajan 2 moottorin tärkeimmät tekniset tiedot	54
Taulukko 10.	Valmistajan 2 DPF tiedot.	55

Lyhenteet

CO	hiilimonoksidi
DPF	hiukkassuodatin
EGR	pakokaasujen takaisinkierrätys
HC	hiilivety
HVO	vetykäsitelty kasviöljy
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö
LNG	nesteytetty maakaasu
MGO	kaasuöljy
NO _x	typen oksidit
PM	hiukkaspäästöt
SCR	selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen
SO _x	rikin oksidit
ULSFO	erittäin vähärikkinen dieselöljy 0.1 % S

1 Johdanto

Viime vuosien aikana Kansainvälinen merenkulkujärjestö International Maritime Organization (IMO) on esittänyt kansainvälisiä säännöksiä vähentämään merenkulun tyypin oksidipäästöjä ja polttoaineen rikkipitoisuutta, joilla on yhteys alailmakehän otsonin syntymiseen ja hiukkaspäästöihin. Näillä molemmilla on haitallinen vaikutus ihmisten terveyteen. Myös merenkulusta peräisin olevan mustan hiilen (BC, Black Carbon) määrittelmää, mittausta ja vaikutusta on ryhdytty tutkimaan (IMO, 2015). Mustan hiilen vaikutus arktisilla alueilla on erityisen huomattava. Arktisilla alueilla liikkuvista laivoista peräisin oleva musta hiili kertyy suoraan lumen ja jään päälle, ja mustan hiilen tumma väri poistaa niiden auringon säteilyä heijastavan vaikutuksen. Musta hiili myös pystyy imemään suuren määrän auringon säteilyä itseensä, millä on jäätiköitä sulattava vaikutus. Käyttämällä polaarialueilla vaihtoehtoisia polttoaineita raskaan polttoöljyn (HFO) sijaan kohdistuu alueelle vähemmän ilmastoa lämmittävää ja jäätiköitä sulattavaa mustaa hiiltä (Comer ja muut, 2017; IMO, 2015). Arktisille alueille ollaankin suunnittelemassa HFO:n käytön kieltä alkaen 1.7.2024 (IMO, 2020a). Tällä hetkellä IMO:n polaarialueiden meriturvallisuuden parantamiseen ja meriympäristön suojelemiseen tähtäävä Polaarikoodi (Polar Code) ainoastaan suosittelee olemaan käyttämättä ja kuljettamatta HFO:ta arktisilla alueilla. Etelämantereella HFO:n käyttö ja kuljettaminen on ollut kielletty jo vuodesta 2011 alkaen (ICCT, 2017).

Tämä diplomityö on toteutettu meriteknologiaan ja laivanrakennukseen erikoistuneelle Helsinki Shipyardille. Työn tavoitteena oli tutkia, miten erittäin tiukat päästörajat sisältävä hyötyajoneuvojen Euro VI -päästönormi voidaan saavuttaa arktisilla alueilla liikkuvassa expedition-risteilijässä. Päästönormi on typenoksidipäästöjen (NO_x) osalta huomattavasti tiukempi kuin säädösten edellyttämä IMO Tier III -raja. Euro VI -päästönormissa asetetaan rajat myös hiukkaspäästöille, hiilivedyille ja hiilimonoksidille. Tutkimuksen aihe on tärkeä päästönormien tiukentuessa meriliikenteessä ja päästöjen aiheuttamien ympäristö- ja terveyshaittojen takia. Arktiselle alueelle kohdistuvassa expedition-risteilijässä on otettava huomioon alueen erityinen herkkyys päästöille.

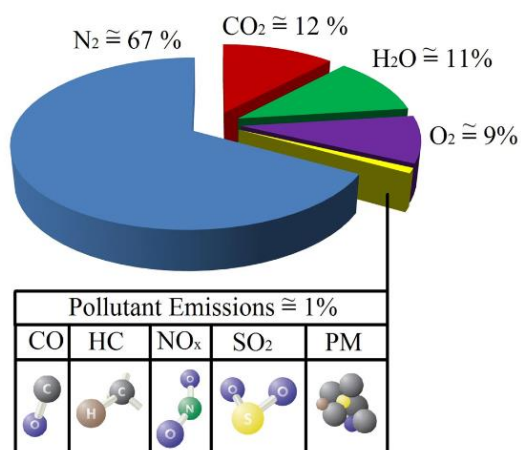
Tiukkojen Euro VI -päästömääräysten saavuttaminen vaatii useita pakokaasujen jälkikäsitteilykomponentteja, kuten SCR-katalysaattoreita ja hiukkassuodattimia. Jälkikäsitteilyjärjestelmän suunnittelussa on huomioitava tarkasteltavassa expedition-risteilijässä oleva tila pakokaasuputkiston komponenteille, komponenttien järjestys ja järjestelmän aiheuttama kokonaisvastapaine. Komponentit on pyrittävä sijoittamaan niille varattuun tilaan kuiluun ja konehuoneeseen siten, että tilantarpeita ei tarvitse kasvattaa. Komponenteille varatun tilan kasvattaminen ei ole kannattavaa risteilyn näkökulmasta, sillä se vie tilaa esimerkiksi hyttikapasiteetilta. Jälkikäsitteilykomponenttien järjestyksessä ja sijoittamisessa on huomioitava niiden vaatimat operointilämpötilat, tilatarpeet ja paino. Jälkikäsitteilykomponentit myös johtavat suurempaan vastapaineeseen pakokaasusysteemissä, mikä puolestaan johtaa kasvavaan polttoaineen kulutukseen ja voi aiheuttaa ongelmia moottorin toiminnalle (Oksanen ja muut, 2016, s. 7). Tämän vuoksi järjestelmän kokonaisvastapaine on pyrittävä saaman mahdollisimman pieneksi.

Diplomityö koostuu kirjallisuuskatsauksesta, jossa esitellään dieselmoottorin päästöt, terveyshaitat ja niiden syntyminen. Hiukkaspäästöjen koostumus ja muodostumien esitellään. Samoin kartoitetaan nykyiset ja lähitulevaisuudessa voimaan astuvat päästörajoitukset meriliikenteessä. Tämän jälkeen selvitetään, millaisia päästöarvoja vaihtoehtoisilla polttoaineilla on ja kuinka lähelle Euro VI -tavoitetta vaihtoehtoisia polttoaineita käyttämällä päästäisiin. Tarkasteltavat polttoaineet ovat erittäin vähärikkinen polttoöljy (ULSFO), vetykäsitelty kasviöljy (HVO) ja nesteytetty maakaasu (LNG). Kirjallisuuskatsauksen viimeisessä osiossa esitellään pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmät ja niiden vaikutukset päästöihin ja vastapaineisiin. Jälkikäsitteilyosuudessa kuvataan erityisesti hiukkassuodattimen (DPF) ja typenoksideja pelkistävän katalysaattorin (SCR) sekä pakokaasujen takaisinkierrätyksen toimintaperiaatteet ja arvioidaan niiden soveltamista meriliikenteen käyttöön. Myös polttoaineiden ja voiteluöljyn vaikutukset jälkikäsitteilykomponenttien toiminnalle arvioidaan. Tekniikoita pakokaasujen jälkikäsitteilykomponenttien aiheuttaman vastapaineen kompensointiin esitetään kirjallisuudesta kerättyjen tutkimusten ja haastattelun kautta.

Tutkimuksen empiirisessä osassa arvioitiin valmistajien tarjoamia kokonaisratkaisuja Euro VI -päästönormin saavuttamiseksi. DPF- ja SCR-komponenttien tarvitsema tila kuvataan teho-tilavuus -kuvaajalla. Pakokaasusysteemin komponenttien kokonaisvastapaineen vaikutuksia tarkasteltiin ja esitetään keinoja, joilla sitä voitaisiin laskea. AutoCAD-suunnitteluohjelmistolla piirrettiin konsepti-layout pakokaasusysteemistä. Layout-piirroksissa esitetään DPF- ja SCR-komponenttien järjestys ja niiden tarvitsema tila.

2 Dieselmoottoreiden päästöt

Dieselmoottori muuntaa polttoaineen kemiallisen energian mekaaniseksi voimaksi. Dieselpolttoaine on hiilivetyjen sekoitus, joka teoreettisesti tuottaa vain hiilidioksidia (CO_2) ja vesihöyryä (H_2O) palamisen aikana. Pakokaasu koostuu pääosin CO_2 :sta, H_2O :sta ja ah-toilman palamattomasta osuudesta. Palamisen päätuotteilla ei ole ympäristölle haitallisia vaikutuksia, lukuun ottamatta CO_2 , joka on kasvihuonekaasu, ja jonka vaikutus ilmaston lämpenemisessä on merkittävä. Hiilidioksidipäästöt ovat suoraan yhteydessä polttoaineen kulutukseen, joka määräytyy suurelta osin vaaditusta tehosta, energiatehokkuudesta ja polttoaineen koostumuksesta. Dieselmoottoreiden terveydelle ja ympäristölle haitalliset päästöt ovat alle 1 % pakokaasujen koostumuksesta (Kuva 1). Haitalliset päästöt ovat peräisin palamisprosessin aikana tapahtuvista ei-halutuista prosesseista, kuten polttoaineen epätäydellinen palaminen, korkean lämpötilan ja paineen alla tapahtuvat reaktiot, voiteluöljyn ja sen lisäaineiden palaminen, polttoaineen rikin ja polttoaineen lisäaineiden palaminen. Haitalliset päästöt koostuvat pääosin pienhiukkas- (PM), typenoksidi- (NO_x), hiilivety- (HC), hiilimonoksidi- (CO) ja rikkioksidipäästöistä (SO_x). Haitallisista päästöistä NO_x ja PM ovat myrkyllisimpiä ja niitä rajoitetaan maailmanlaajuisesti (Majewski & Khair, 2006).



Kuva 1. Dieselmoottorien päästöjen koostumus (Azam ja muut, 2016).

2.1 Typpioksidit

NO_x päästöt ovat kaasuja ja koostuvat pääosin typpimonoksidista (NO) ja typpidioksidista (NO₂). Moderneissa dieselmootoreissa NO₂:n osuus NO_x-päästöistä voi olla jopa 15 % tai enemmän. Pääosa typenoksideista syntyy palamisen yhteydessä palamisilman typen hapettuessa korkean lämpötilan ja paineen alla. Jos polttoaine sisältää typpeä, myös siitä muodostuu typpimonoksidia. Tavallisista dieselmootorin polttoaineista vain raskas polttoöljy sisältää merkittävässä määrin typpeä. NO on väritön ja vain kohtalaisen myrkyllinen. Osa siitä kuitenkin hapettuu NO₂:ksi, joka on paljon haitallisempi kaasu. NO_x-päästöt aiheuttavat silmien ja hengityselimistön ärsytystä. NO₂ on erittäin myrkyllinen kaasu ja voi suurena (200 ppm) keskittymänä olla kuolettava. (Majewski & Khair, 2006).

2.2 Hiukkaspäästöt

Dieselmootorin hiukkaspäästöt ovat rajoitetuista päästöistä monimutkaisin määritellä, sillä ne koostuvat useasta eri komponentista. Pienhiukkasten luokittelu kemiallisen koostumuksen mukaan ei tämän vuoksi ole yksiselitteistä. Yleisellä tasolla dieselmootorin hiukkaspäästöt ovat peräisin polttoaineen ja ilman mukana tulleesta orgaanisesta ja epäorgaanisesta aineksesta (Majewski ja Jääskeläinen, 2019).

Majewski & Khair (2006) luokittelevat PM- päästöt koostumuksen mukaan kolmeen ryhmään seuraavasti:

1. Kiinteä osuus (SOL)
 - Hiili
 - Tuhka
2. Orgaaninen osuus (SOF)
 - Orgaaninen materiaali moottorin voiteluöljystä
 - Orgaaninen materiaali polttoaineesta
3. Sulfaatti partikkelit (SO₄)
 - Rikkihappo
 - Vesi

Tätä määrittelyä käyttäen voidaan kokonaishiukkaspäästöt määritellä seuraavasti (Majewski ja Khair, 2006):

$$TPM = SOL + SOF + SO_4$$

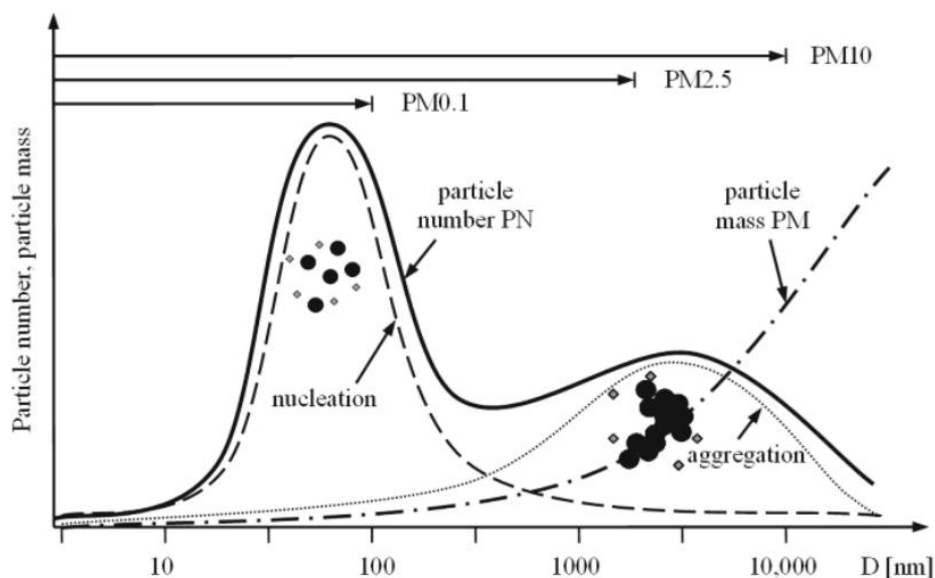
Dieselmoottorin hiukkaspäästöt koostuvat pääosin kiinteästä hiilimateriaalista, jota kutsutaan myös noeksi tai mustaksi hiileksi. Kyseinen materiaali on peräisin dieselmoottorissa tapahtuvasta epäpuhtaasta palamisesta. Polttoaineesta ja voiteluaineesta peräisin olevalla rikillä on osuus sulfaattipartikkeleiden muodostumiseen. Sulfaatit sitovat vettä itseensä, jonka vuoksi niiden massa voi kaksinkertaistua. Orgaaninen osuus koostuu pääosin voiteluöljystä peräisin olevista hiilivedyistä. Palamattomalla polttoaineella on myös pieni osuus orgaanisiin päästöihin. Hiukkaspäästöjen tuhka on pääosin peräisin voiteluöljyn lisäaineiden palamisesta, moottorin kulumisesta peräisin olevista metallioksidien palamisesta ja pakokaasukomponenttien korroosioista peräisin olevista rautaoksidoista (Majewski ja Khair, 2006).

Hiukkaset voidaan luokitella niiden halkaisijan mukaan seuraavasti (Merkisz ja Pielecha, 2015):

- Karkeat hiukkaset PM_{10} (2,5–10 μm)
- Pienhiukkaset $PM_{2,5}$ (<2,5 μm)
- Ultrapienet hiukkaset $PM_{0,1}$ (<0,1 μm)
- Nano hiukkaset $PM_{0,05}$ (<0,05 μm)

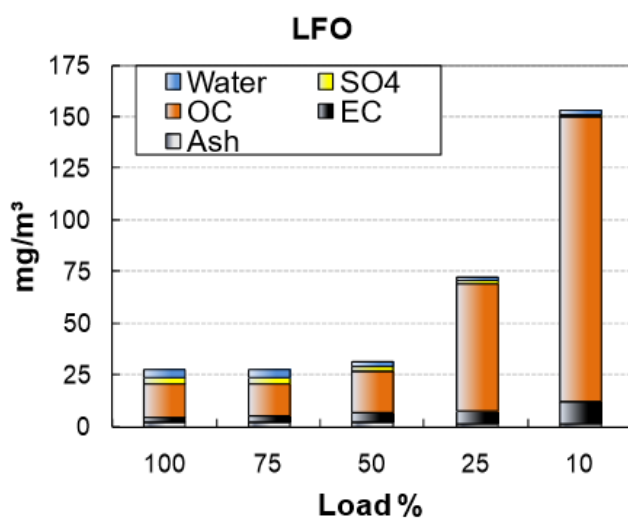
PN (Particle Number) eli hiukkaslukumääräpitoisuus kuvaa hiukkasten lukumäärää. Sitä hallitsevat nano hiukkaset, jotka kattavat noin 90 % hiukkasten lukumäärästä, mutta kattavat vain noin 10–20 % hiukkasmassasta (Merkisz ja Pielecha, 2015). Nano hiukkaset koostuvat pääosin hiilivedyistä, rikkihaposta ja vedestä. PM massasta suurimman osan kattavat ultrapienet- ja pienhiukkaset. Ne koostuvat hiilipartikkeleista ja muista kiinteistä materiaaleista. Näitä ovat pääosin kiinteän hiilen ja hiilivetyjen yhdistelmät, mutta niihin

voi kuulua myös rikkiyhdisteitä, tuhkaa ja sylintereiden kulumisesta peräisin olevaa metallia (Majewski ja Khair, 2006).



Kuva 2. Polttomoottorin hiukkasten kokojakauma esitettynä massana ja lukumääränä (Merkisz ja Pielecha, 2015).

Hiukkaspäästöjen koostumus riippuu suuresti käytetystä moottorista, testiolosuhteista ja polttoaineen rikkipitoisuudesta (Majewski ja Khair, 2006). Moottorin kuormituksella ja polttoaineen laadulla on vaikutus dieselmoottorin hiukkaspäästöjen koostumukseen. Ristimäen ja muiden (2010) koe osoittaa (Kuva 3), että käyttämällä kevyttä polttoöljyä (LFO) hiukkaspäästöt koostuvat pääosin orgaanisesta osuudesta kaikilla kuormituksilla. Hiukkasten määrä kasvaa huomattavasti pienillä kuormituksilla (10–25 %). Myös Okada ja muut (2007) havaitsivat orgaanisen osuuden kasvavan kuormituksen laskiessa. Sen arvellaan olevan peräisin palamattomasta polttoaineesta.



Kuva 3. Hiukkasten koostumus eri kuormituksilla käytettäessä LFO (Ristimäki ja muut, 2010).

2.3 Dieselmoottorin NO_x-PM Trade-Off

Dieselmoottorin NO_x- ja PM-päästöjen yhtäaikainen vähentäminen kehittämällä palamisprosessia on hankalaa. NO_x- ja PM-päästöjen välillä esiintyy niin sanottu trade-off ilmiö ja se on suuri ongelma dieselmoottoreiden päästöjen hallinnassa (Okuba ja Kuwahara, 2019, s. 79). Dieselmoottorin suunnitteluun liittyvät tekniikat, jotka johtavat matalampiin NO_x-päästöihin nostavat PM-päästöjä (Jääskeläinen ja Majewski, 2019). Useimmat NO_x-päästöjen laskemiseen käytetyt tekniikan perustuvat palamislämpötilan laskemiseen, joka puolestaan nostaa PM-päästöjä (Majewski ja Khair, 2006, s. 110). Korkeammilla lämpötiloilla palaminen on täydellisempää, mikä johtaa vähäisempiin PM-päästöihin, mutta korkeampiin NO_x-päästöihin (Heck ja muut, 2016, s. 245).

2.4 Muut kaasumaiset päästöt

2.4.1 Rikin oksidit

Rikin oksidit (SO_x) ovat kaasumaisia päästöjä ja ne koostuvat pääasiassa rikkidioksidista (SO₂) ja rikkitrioksidista (SO₃). Palamisprosessin aikana polttoaineen rikistä noin 95–98 %

hapettuu rikkioksidiksi. Rikkidioksidi havaitaan värittömänä ja ärsyttävänä kaasuna. Rikkioksidin hapettuessa syntyy rikkiatriksidia, joka veden kanssa reagoidessaan muodostaa rikkihappoa. Rikkihappo luokitellaan aikaisemman määrittelyyn perusteella sulfaattipartikkeleiden alle. Noin 2–4 % polttoaineen rikistä poistuu rikkiatriksidina moottorista. Murto-osa SO_x -päästöistä muuttuu hiukkaspäästöiksi, suurin osa esiintyy kaasumaisina SO_2 - ja SO_3 -päästöinä pakokaasussa. Rikkidioksidi on peräisin poltto- ja voiteluaineesta peräisin olevasta rikistä. Polttoaineen rikkipitoisuudella on suora yhteys SO_x -päästöihin. SO_x -päästöihin ei voida vaikuttaa moottorin palamisprosessia muokkaamalla, vaan joudutaan esimerkiksi käyttämään jälkikäsittelyjärjestelmiä tai vaihtamaan polttoainetta. (Majewski ja Khair, 2006; Okubo & Kuwahara, 2019).

2.4.2 Hiilivedyt

Dieselmoottorin pakokaasun rajoitetut hiilivedyt (HC) ovat kaasumaisia ja sekoitus useaa eri hiilivetylajia. Dieselmoottorin hiilivedyt ovat peräisin pääosin palamattomasta polttoaineesta. Voiteluaineen päätyminen pakokaasuun on myös hiilivetyjen lähde. Osa hiilivedyistä on hyvin myrkyllisiä ja karsinogeenisiä. Matalissa lämpötiloissa osa hiilivedyistä voi lauhtua nestemäiseksi tai kiinteäksi, ja nämä luokitellaan aikaisemmin esiteltyjen PM-päästöjen yhteydessä SOF-ryhmän alle. Hiilivetypäästöjä rajoitetaan joko kokonaishiilivety- (THC, Total Hydrocarbons) tai metaanittomat hiilivedyt (NMHC, Non-methane Hydrocarbons) päästörajoituksilla (Majewski ja Khair, 2006, s. 123). Metaani (CH_4) on hiilidioksidin kanssa yksi suurimmista ilmaston lämmittäjistä ja palamaton metaani on suurin ympäristöongelma kaasukäyttöisten moottorien toiminnassa (Ushakov ja muut, 2019).

2.4.3 Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidi (CO) eli häkä on hajuton ja väritön erittäin myrkyllinen kaasu. CO:lle altistuessa se pystyy korvaamaan hapen verenkierrrossa. Korkeana pitoisuutena CO palaa hyvin kirkkaana näkyvänä liekkiä. CO-päästöt modernien dieselmoottoreiden pakokaa-

sussa ovat hyvin alhaiset, noin 10–500 ppm. CO:n muodostuminen on peräisin orgaanisen materiaalin epätäydellisestä palamisesta, mikä aiheutuu hapen puutteesta tai matalasta lämpötilasta joillakin palotilan alueilla. CO on hiilivetyjen palamisessa syntyvä tuote. Dieselmootoreissa CO:n muodostuminen määräytyy ilma/polttoaine sekoituksesta palotilassa. Dieselmootoreiden jatkuvasti korkean polttoaineen ja ilman seossuhteen sekä tehokkaan palamisprosessin takia CO:n muodostuminen on vähäistä (Majewski ja Khair, 2006).

3 Päästörajoitukset

3.1 IMO NO_x-päästörajat

International Convention on the Prevention of Pollution from Ships, joka tunnetaan nimellä MARPOL 73/78, on kansainvälinen IMO:n perustama yleissopimus, joka hallitsee meriympäristön saastumisen ehkäisemistä meriliikenteen päästöiltä ja onnettomuuksilta (IMO, 2020b). Kansainvälisellä tasolla MARPOL VI liite, Sääntö 13, asettaa pakolliset rajat laivojen typenoksidi-päästöille (NO_x). IMO:n päästöstandardit tunnetaan paremmin Tier I-III päästötasoina. ANNEX VI NO_x päästövaatimukset soveltuvat yli 130 kW meridieselmoottoreihin. Tier -vaatimustaso perustuu laivan rakentamispäivämäärään ja päästöraja kyseisen vaatimustason sisällä määräytyy moottorin nimellinopeuden mukaan (IMO, 2020b). Alla olevassa taulukossa 1 kyseiset Tier- vaatimustasot ovat esitettyinä:

Taulukko 1. Tier I-III -rajat (IMO, 2020b).

Tier	Laivan rakentamisaika-kohta	NO _x (g/kWh)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1. Tammikuuta 2000	17,0	$45 \cdot n^{(-0,2)}$	9,8
II	1. Tammikuuta 2011	14,4	$44 \cdot n^{(-0,23)}$	7,7
III	1. Tammikuuta 2016	3,4	$9 \cdot n^{(-0,2)}$	2,0

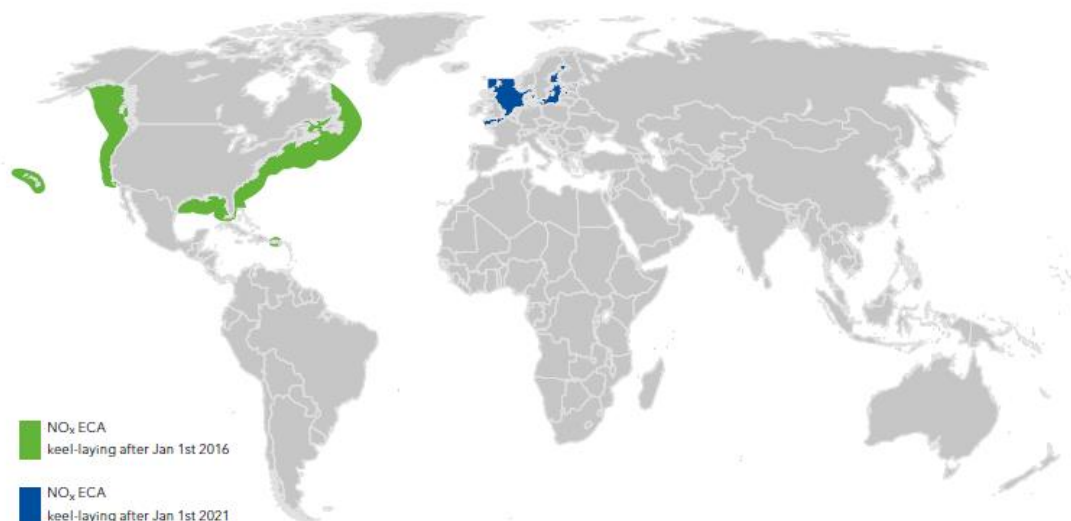
n = moottorin nimellinopeus (rpm)

Taulukon mukaisesti keskinopean esimerkiksi 800 rpm dieselmoottorin Tier III NO_x-päästörajaksi saadaan:

$$9 * n^{-0,2} = 9 * 800^{-0,2} = 2,36 \text{ g/kWh}$$

Jokainen Tier-vaatimustaso alentaa NO_x-päästöjä edelliseen verrattuna. Nykyinen kansainvälinen Tier II -taso leikkaa NO_x-päästöjä noin 20 % Tier I -tasoon verrattuna. Tier III -taso kohdistuu laivoihin, jotka ovat rakennettu 1. tammikuuta 2016 tai sen jälkeen ja jotka toimivat tiukempia päästövaatimuksia noudattavilla NO_x ECA (Emission Control Areas) alueilla. Tier III leikkaa päästöjä noin 80 % Tier I -tasoon verrattuna. (DieselNet,

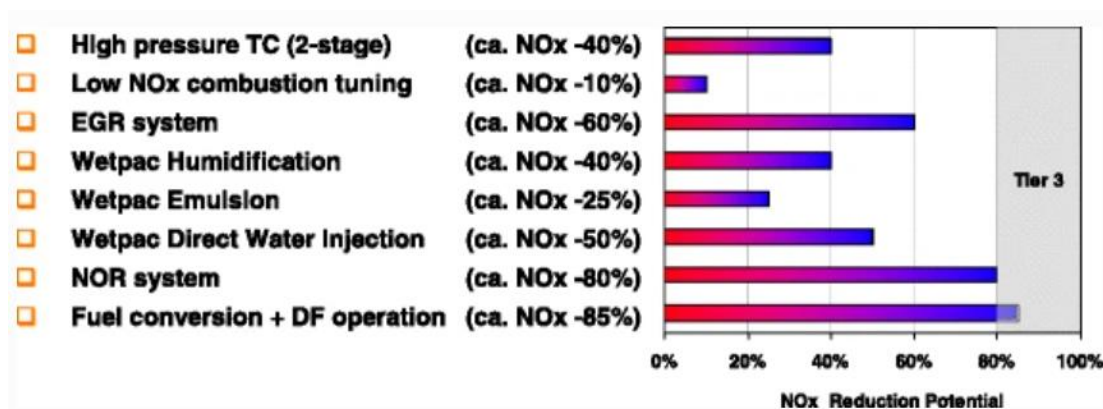
2020). Voimassa olevat typenoksidien valvonta-alueet, North American ECA ja US Caribbean ECA, ovat esitettyinä alla olevassa kartassa (Kuva 4). Tulevia NO_x ECA alueita vuodesta 2021 eteenpäin ovat Itämeri ja Pohjanmeri (IMO, 2020).



Kuva 4. Nykyiset NO_x ECA alueet (sinisellä merkityt) ja vuodesta 2021 eteenpäin (vihreällä merkityt) (IACCSEA, 2019)

Tier II -vaatimustaso saavutetaan optimoimalla moottorin palamisprosessia parametrien kautta. Kyseisiin parametreihin kuuluu polttoaineen ruiskutuksen ajoitus, paine, nopeuden säätely, polttoainesuuttimen virtauksen vaikutusala, pakoventtiilin ajoitus ja sylinterin puristustilavuus (DieselNet, 2020.) Tier -III vaatimustaso vaatii NO_x-päästöjen vähentämiseen erikoistunutta tekniikkaa tai nesteytetyn maakaasun (LNG) käyttöä (DieselNet, 2020; Suomen Varustamot 2018). Kyseisiä tekniikoita ovat pakokaasujen takaisinkierrätys, veden sisällyttäminen palamisprosessiin ja selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (SCR) (DieselNet, 2020). Yleiskatsaus käytettävissä olevista NO_x-päästöjen vähentämi-

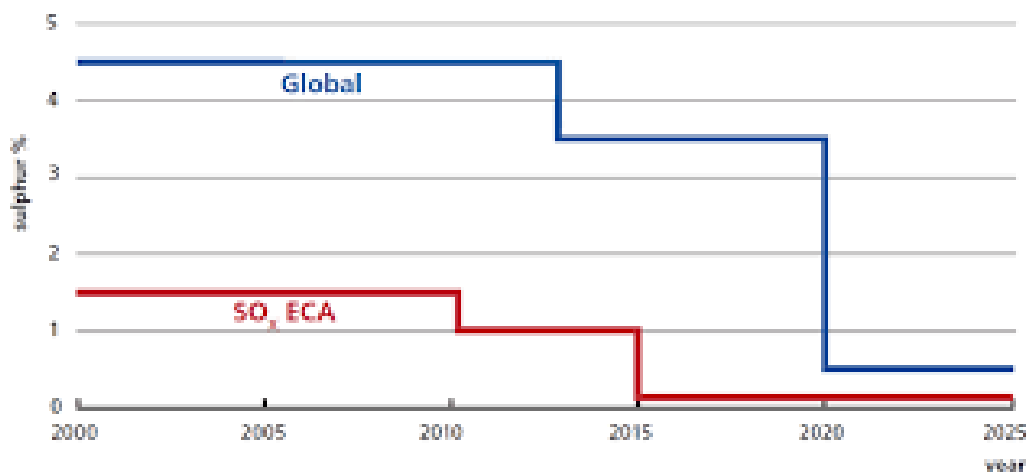
seen erikoistuneista tekniikoista on esitetty kuvassa 5 (Wik & Niemi, 2016). Tehokkaimpia ratkaisuja ovat SCR-tekniikka (NOR system) ja DF-moottori LNG käytöllä, joilla saavutetaan 80–85% vähennys NO_x-päästöissä.



Kuva 5. NO_x-päästöjen vähentämistekniikat (Wik & Niemi, 2016).

3.2 Polttoaineiden rikkihaittoisuus ja hiukkaspäästöt

MARPOL VI-liite, Säännös 14 asettaa rikkihaittoisuusrajat meriliikenteessä käytetyille polttoaineille. Kyseisellä säädöksellä hallitaan SO_x-päästöjä ja epäsuorasti hiukkaspäästöjä. Hiukkaspäästöjä ei rajoiteta erikseen (DieselNet, 2020). Kyseiset rikkihaittoisuusrajat maailmanlaajuisesti ja tiukempia SO_x-päästövaatimuksia noudattavilla SO_x ECA (Emission Control Area) alueilla ovat esitettyinä alla olevassa kuvassa 6.



Kuva 6. Polttoaineen rikki- ja rikkidioksidipitoisuus rajat maailmanlaajuisesti ja SO_x ECA -alueilla (DieselNet, 2020).

Vuonna 2020 voimaan astuva rajoitus pakottaa laivat käyttämään maailmanlaajuisesti polttoaineita, joiden rikki- ja rikkidioksidipitoisuus ei ylitä 0,5 % tai käyttämään vaihtoehtoisia menetelmiä, kuten esimerkiksi rikkipesureita, jotka ovat yhtä tehokkaita SO_x-päästöjen vähentämisessä kuin rikki- ja rikkidioksidipitoisuusrajoitus. Vaihtoehtoisia menetelmiä käyttäessä SO_x-päästöt pitää saada rajoitetuksi ≤ 6 g/kWh (SO₂). ECA-alueilla polttoaineen rikki- ja rikkidioksidipitoisuus rajana on ollut vuodesta 2015 eteenpäin 0.1 % (DieselNet, 2020; Lloyd's Register, 2012).

3.3 IMO tulevaisuus

Vuonna 2012 kansainvälisen meriliikenteen arvioitiin tuottavan 2,2 % maailmanlaajuisista hiilidioksidipäästöistä. Vaikka kansainvälinen meriliikenne on energiatehokkain joukkoliikenteen muoto ja pieni vaikuttaja kokonaishiilidioksidipäästöihin, nopeasti kasvavan meriliikenteen vuoksi sen energiatehokkuuden parantamista ja tehokasta päästöjen rajoittamista tarvitaan maailmanlaajuisesti. Kansainvälisen meriliikenteen aiheuttamien päästöjen on arvioitu kasvavan 50–250 % vuoteen 2050 mennessä. Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships on IMO:n huhtikuussa 2018 asettama suunnitelma laskea meriliikenteestä peräisin olevia kasvihuonekaasuja. Siihen kuuluu hiilidioksidipäästöjen kuljetussuoritusten tonnia/kilometri leikkaaminen vähintään 40 %

vuoteen 2030 mennessä ja 70 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon. Vuosittaisia kokonaiskasvihuonekaasuja kansainvälisestä merenkulusta on tarkoitus laskea vähintään 50 % verrattuna vuoden 2008 tasoon (IMO, 2019).

3.4 Euro VI

EURO I-VI-päästöluokitukset ovat Euroopan Unionin (EU) asettama päästölainsäädäntö raskaille dieselhyötyajoneuvoille. Uusin päästöluokka Euro VI astui voimaan 1.1.2013. Päästöluokitukset ilmaisevat sallitut päästöjen raja-arvot. Euro VI rajoittaa CO-, HC-, NO_x-, PM-, ja PN-päästöjä. Euro VI tiukensi huomattavasti päästörajaa Euro V:sta NO_x- ja hiukkaspäästöjen osalta. (DieselNet, 2019; Günther 2018). Uutena mukaan tuli hiukkaslukumäärärajoitukset. Alla olevassa taulukossa on esitetty Euro I-VI päästöluokitusten voimaanastumis ajankohdat ja päästökomenttien rajat.

Taulukko 2. Euro VI-päästörajoitukset (DieselNet, 2019).

Stage	Date	Test	CO	HC	NO _x	PM	PN	Smoke
			g/kWh				1/kWh	1/m
Euro I	1992, ≤ 85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612		
	1992, > 85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36		
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25		
	1998.10	4.0	1.1	7.0	0.15			
Euro III	1999.10 <i>EEV only</i>	ESC & ELR	1.5	0.25	2.0	0.02		0.15
	2000.10		2.1	0.66	5.0	0.10 ^a		0.8
Euro IV	2005.10		1.5	0.46	3.5	0.02		0.5
Euro V	2008.10		1.5	0.46	2.0	0.02		0.5
Euro VI	2013.01	WHSC	1.5	0.13	0.40	0.01	8.0×10 ¹¹	

^a PM = 0.13 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹

Taulukossa 2 esitettyjen päästökomenttien NO_x- ja PM-pitoisuudet ilmaistaan g/kWh. Euro I-VI -päästöluokituksissa ei oteta huomioon moottorin nimellispyörimisnopeutta, vaan ajoneuvoluokka, joka on Euro I-VI -päästöluokitusten tapauksessa hyötyajoneuvot >3,5 t ja linja-autot dieselmoottorilla >3,5 t (Günther, 2018).

Euro VI -päästöluokan saavuttaminen raskaalta ajoneuvolta vaatii pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien käyttöä, kuten pakokaasujen takaisinkierätyks (EGR), hapettava katalysaattori (DOC), hiukkassuodatin (DPF) ja typenoksideja pelkistävä katalysaattori (SCR), sekä näiden yhdistelmiä, esimerkiksi DPF+SCR-järjestelmiä (Günther, 2018, s. 25, 56; The International Council on Clean Transportation, 2016).

3.5 IMO-päästörajat vs. Euro VI

Taulukossa 3 esitetään yhteenveto edellä kuvatuista IMO- ja Euro VI-päästörajoituksista sovellettuina tämän tutkimuksen kohteena olevaan expedition-risteilijään. NO_x-päästöjen lisäksi Euro VI-päästörajoituksessa kaasumaisista päästöistä rajoitetaan CO-, ja HC-päästöjä. Hiukkaspäästöjä rajoitetaan massana (PM) ja hiukkaslukumääräpitoisuutena (PN). Myös polttoaineen sisältämä sallittu rikki-pitoisuus on huomattavasti matalampi 0,001 S %.

Taulukko 3. Yhteenveto IMO- ja Euro VI-päästörajoituksista.

	CO	HC	NO _x	PM	PN	S %
IMO	-	-	$9 \cdot n^{(-0,2)}$	-	-	0,1/0,5
Euro VI	1,5 g/kWh	0,13 g/kWh	0,40 g/kWh	0,01 g/kWh	$8,0 \cdot 10^{11}$ 1/kWh	0,001

4 Päästöarvot eri polttoaineilla

Tässä luvussa esitetään, millaisia päästöarvoja vaihtoehtoisilla polttoaineilla on ja kuinka pitkälle niitä käyttämällä päästäisiin Euro VI päästötavoitteessa. Tutkittavat polttoaineet ovat erittäin vähärikkinen polttoöljy (ULSFO), vetykäsitelty kasviöljy (HVO) ja nesteytetty maakaasu (LNG). MGO:ta käytetään referenssipolttoaineena. MGO eli kaasuöljy on yleisimpiä meriliikenteessä käytettäviä polttoaineita. Sillä tarkoitetaan polttoaineita, jotka koostuvat vain tisleistä ja se voi koostua useasta eri tisleiden sekoituksesta (Marquard & Bahls, 2020). Vähärikkisen MGO:n rikkipitoisuus on 0,1 % tai vähemmän. Taulukkoon 8 kerättyjen tutkimusten perusteella MGO:n PM- ja NO_x-päästöt liikkuvat 0,05–0,25 ja 5,0–9,0 g/kWh alueilla.

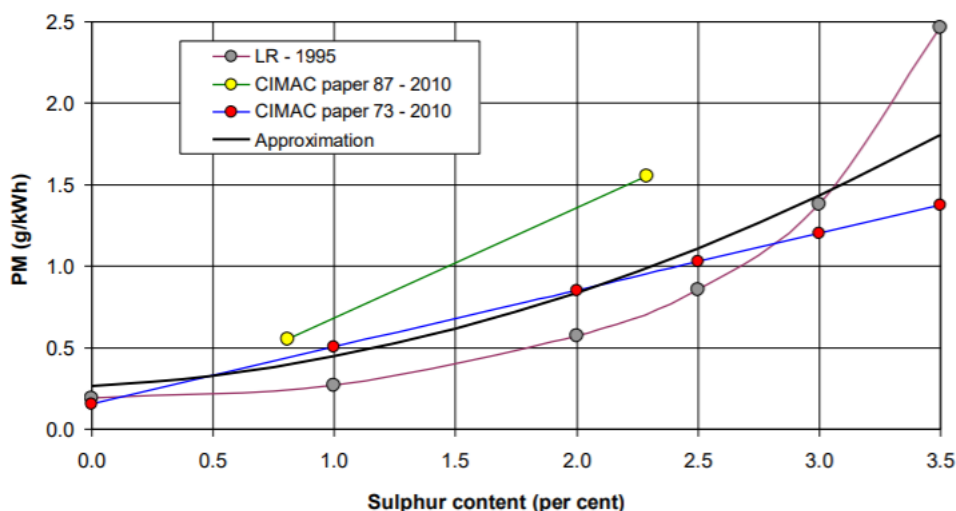
4.1 Polttoaineiden ominaisuuksien vaikutus päästöihin

Tärkeimmät polttoaineiden ominaisuudet raskaan dieselmoottorin päästöissä ovat (DieselNet, 2002):

- Rikkipitoisuus
- Setaaniluku
- Aromaattiset yhdisteet
- Tiheys
- Haihtuvuus
- Hapettimet

Polttoaineen ominaisuuksilla ei ole enää niin suurta vaikutusta moderneissa dieselmoottoreissa kuin ennen, lukuun ottamatta polttoaineen rikkipitoisuutta. Polttoaineen sisältämästä rikistä aiheutuu SO₂ päästöjä, ja osa rikistä muuttuu rikkitrioksidiksi ja rikkihapoksi. Polttoaineen on rikkipitoisuus tärkeä ominaisuus päästöjen jälkikäsittelyratkaisuja tarkastellessa. Useiden jälkikäsittelyratkaisujen, esimerkiksi DPF ja SCR komponenttien toiminta häiriintyy pakokaasujen sisältämien rikkiyhdisteiden takia. Yhdistettävyyden jälkikäsittelyn kanssa ja suorat päästövähennykset ovat suurimmat syyt dieselpolttoaineiden rikkipitoisuuden vähentämisessä (DieselNet, 2002).

Alla olevassa kuviossa on esitettyä polttoaineen sisältämän rikin ja PM-päästöjen yhteys. Rikkipitoisuuden kasvaessa kasvavat myös PM-päästöt. Kuvan 7 mukaan esimerkiksi 0,5 % S sisältävällä polttoaineella hiukkaspäästöt liikkuvat 0,3–0,4 g/kWh välillä (Kristenen, 2015).



Kuva 7. Polttoaineen rikkipitoisuuden ja PM-päästöjen yhteys (Kristensen, 2012).

Polttoaineiden ominaisuuksien vaikutuksia on esitelty alla olevassa taulukossa 4 (DieselNet, 2002):

Taulukko 4. Polttoaineiden ominaisuuksien vaikutukset päästöihin (DieselNet, 2002)

	HC	CO	NOx	PM
Reduced Sulfur	0	0	0	↓↓... ↓ ^b
Increased Cetane Number	↓↓... 0 ^a	↓↓... 0 ^a	↓	0
Reduced Total Aromatics	0	0	↓ ^c	0
Reduced Polyaromatics	↓	0	↓ ^c	↓↓... 0 ^a
Reduced Density	↑↑	↑	↓	↓↓... 0 ^a
Reduced T95	↑	↑	↓	0
Increased Oxygenate*	↑	↓	0	↓
* - tentative results, require confirmation by future work				
a - effect disappears on low emission engines				
b - smaller effects are observed with low sulfur levels				
c - polyaromatics are expected to give a bigger reduction than mono aromatics				
Legend: ↑↑ - large effect; ↑ - small effect; ↓ - very small effect; 0 - no effect				

Polttoaineen korkeampi setaaniluku laskee NO_x-, HC- ja CO-päästöjä. Aromaattipitoisuutta laskemalla saavutetaan pieni lasku (0–5 %) NO_x-päästöissä. PM-, HC- ja CO- päästöihin aromaattipitoisuutta laskemalla arvellaan olevan hyvin pieni tai olematon vaikutus. Polttoaineen pienempi tiheys laskee NO_x- ja PM-päästöjä vain vähän, mutta nostaa arvellusti HC- ja CO-päästöjä. Haihtuvuutta laskemalla arvellaan saavutettavan pieni lasku NO_x-päästöissä, mutta pieni nousu HC- ja CO-päästöissä. Nostamalla hapettimien määrää PM- ja CO-päästöt laskevat hieman, mutta HC-päästöt voivat nousta (DieselNet, 2002).

4.2 ULSFO

ULSFO:lla tarkoitetaan uusia erittäin vähärikkisiä 0,1 < S dieselpolttoaineita, joilla pyritään täyttämään SO_x ECA 0,1 % S vaatimukset. ULSFO rikkipitoisuus on enimmillään 0,1 %. Niiden arvellaan olevan kustannustehokas vaihtoehto perinteiselle MGO:lle, joka on yleisin käytetty 0,1 % S meripolttoaine. ULSFO koostumus vaihtelee laajasti polttoaineiden toimittajien mukaan. Kyseinen uusi polttoaine tyyppi voidaan jakaa karkeasti seuraaviin kategorioihin (Marquard & Bahls 2020; CIMAC, 2015):

1. Erittäin vähärikkiset raskaat polttoöljyt. Näillä on matalampi viskositeetti ja tiheys, ja paremmat syttymis- ja palamisominaisuudet kuten perinteisellä HFO:lla
2. Kevyen polttoöljyn sekoitukset, joissa pienimäärä raskasta polttoöljyä
3. Raskastisleet, joissa matala metallipitoisuus, mutta suurempi viskositeetti kuin MGO:lla

Tutkimuksia ULSFO päästöistä löytyy hyvin vähän. Zetterdahl ja muut (2016) tutkivat S < 0,5 HFO:n ja erittäin vähärikkisen raskaan polttoöljyn S < 0,1 (RMB30) käytön hiukas- ja kaasupäästöjä SCR-järjestelmällä varustetussa laivassa. Tutkimuksen tulokset on koottu taulukkoon 5. Molempien polttoaineiden ominaisuudet on esitetty tarkemmin liitteessä 1. RMB30 polttoaine voidaan luokitella ominaisuuksien puolesta aikaisemmin esitettyyn kategoriaan 1, erittäin vähärikkiset raskaat polttoöljyt. Polttoaineen vaihdolla ei ollut vaikutuksia NO_x-päästöihin. Käytössä oleva SCR-järjestelmä vähensi NO_x-päästöjä noin 95 %,

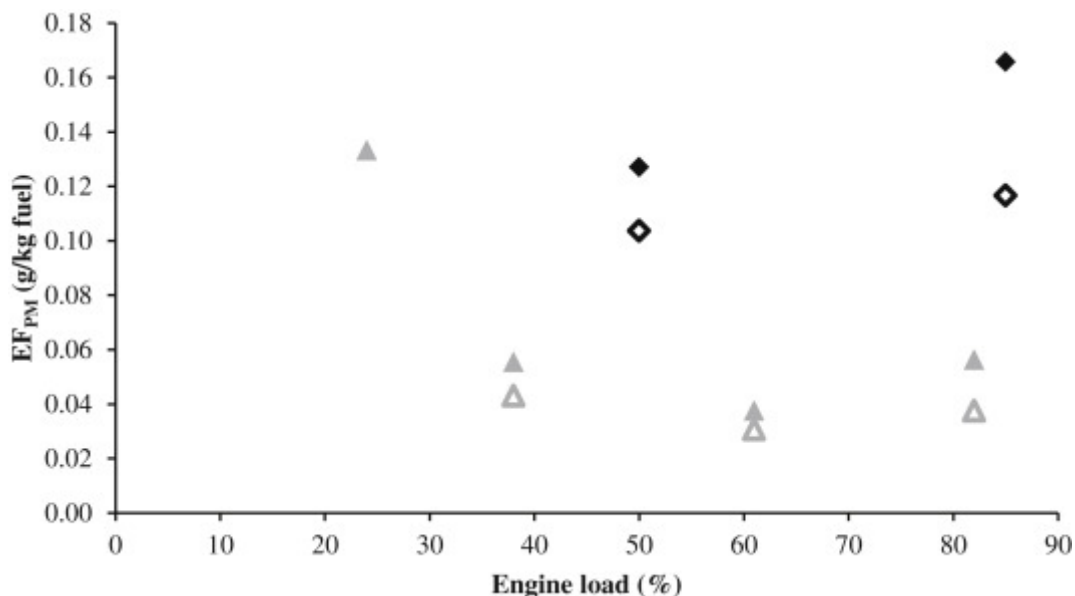
kun käytettiin RMB30, jolloin NO_x-päästöt olivat 0,71–0,85 g/kWh. Tämä on huomattavasti alempi kuin Tier III -raja kyseiselle laivalle (2,5 g/kWh, 600 rpm). PM-päästöt (EF_{TSP}) 61 % ja 82 % kuormituksilla RMB30 käytöllä olivat 0,03–0,04 g/kWh. Kuvassa 8 on esitettyä 5,6–560 nm EF_{PM} päästöt. Moottorin ominaiskulutukseksi ilmoitettiin 183 g/kWh.

Taulukko 5. Kaasumaiset päästöt HFO ja RMB30 polttoaineilla (Zetterdahl ja muut, 2016).

Poltto- aine	Kuor- mitus (%)	EF _{NOX} corr (g/kWh)	EF _{NOX} uncorr (g/kWh)	EF _{SO2} (g/kWh)	EF _{CO} (g/kWh)	EF _{CO2} (g/kWh)	EF _{THC} (g/kWh)
HFO	50%	19,7	20,8	1,6	0,5	654	0,02
	85%	14,7	15,6	1,5	0,38	622	0,01
RMB30	24%	20,8	21,6	0,34	2,4	794	0,01
	38%	18,7	19,6	0,29	1,3	668	-
	61%	16,7	17,7	0,27	0,4	583	0,001
	82%	13,3	14,0	0,23	0,4	536	0,002
	40% ^a	0,85	0,89	0,35	1,1	657	0,01
	84% ^a	0,71	0,75	0,27	0,36	546	0,005

^a SCR-järjestelmä käytössä

Vaihtamalla polttoainetta RMB30:aan saavutettiin noin 80–85 % vähennys SO₂-päästöjen osalta. Muihin päästöihin polttoaineen vaihdolla ei ollut merkittävää vaikutusta. NO_x-päästöjen osalta ei Euro VI-rajaa saavutettu pelkällä polttoaineen vaihdolla.



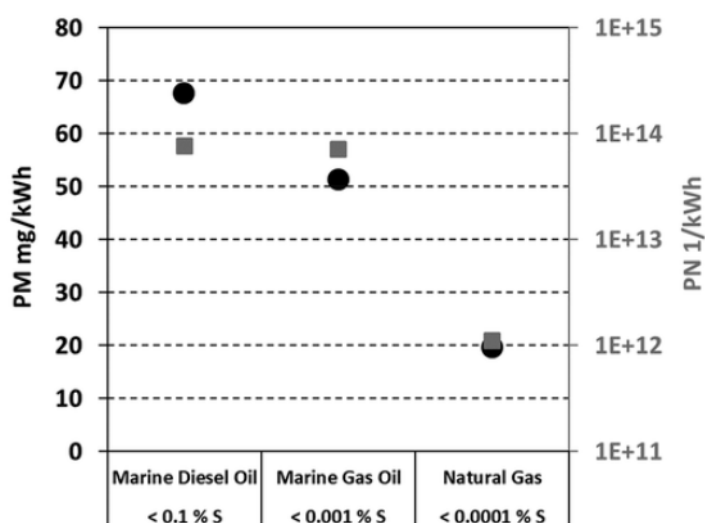
Kuva 8. PM-päästöt eri kuormituksilla. HFO, mustat neliöt; ULSFO, harmaat kolmiot. Täytetyt merkit kuvaavat kokonaishiukkaspäästöjä ja avoimet merkit kuvaavat kiinteitä hiukkaspäästöjä (Zetterdahl ja muut, 2016).

4.3 LNG

LNG (Liquefied Natural Gas) eli nesteytetty maakaasu on maakaasua, joka on jäädytetty $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin se muuttuu nesteeksi. Maakaasu koostuu pääosin hiilivedyistä, suurimpana komponenttina on metaani (CH_4), joka kattaa noin 85–96 % koostumuksesta. Maakaasu sisältää myös vähäisiä määriä etaania (C_2H_6), propaania (C_3H_8), butaania (C_4H_{10}), pentaania (C_5H_{12}) ja typpeä (N_2) (Fernández ja muut, 2017, s. 2). LNG:n käyttö meriliikenteessä laskee NO_x - ja SO_x -päästöjä huomattavasti. LNG-käyttöisten laivojen NO_x -päästöt vähenevät noin 85–90 %, ja SO_x - ja hiukkaspäästöt vähentyvät lähes 100 % verrattuna perinteiseen polttoöljyyn. (IMO, 2016)

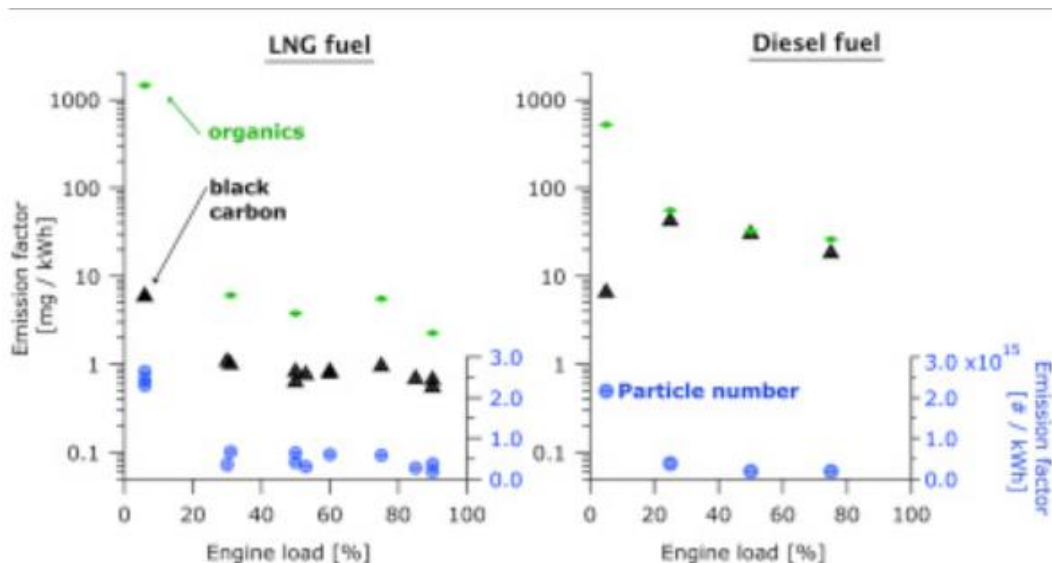
Vuonna 2014 julkaistussa artikkelissa Elgohary ja muut (2014, s. 6–7) ja muut arvioivat raskaan polttoöljyn (HFO) ja nestemäisen maakaasun (LNG) päästöominaisuuksia Dual Fuel moottorin näkökulmasta. Tutkimuksessa todettiin, että LNG:n käyttäminen laivassa HFO:n sijaan vähentää NO_x - ja PM-päästöjä arvioidusti 86 % ja 96 %. Myös SO_x - ja CO_2 -päästöt vähenivät arvioidusti 98 % ja 11 %.

Suomessa tehdyssä tutkimuksessa Lehtoranta ja muut (2019) tutkivat LNG:n, matalarikkipitoisten polttoaineiden ja rikkipesurin vaikutuksia laivanmoottoreiden hiukkaspäästöihin. Mittaukset suoritettiin laboratoriossa ja kahdessa eri laivassa. Laboratoriossa tehty mittausta DF-moottorilla osoittaa, että maakaasulla saavutettiin alhaisimmat hiukkaspäästöt kaikilla kuormituksilla. Kuvassa 9 esitetyt PM-päästöt 85 % kuormituksella LNG:llä olivat noin 0,02 g/kWh, joka on noin 60 % vähemmän kuin MGO:n ja 70 % vähemmän kuin MDO:n PM-päästöt. Voiteluöljyllä arveltiin olleen vaikutus PM-päästöihin.



Kuva 9. PM- (ympyrät) ja PN-päästöt (neliöt) MDO-, MGO- ja NG-käytössä (Lehtoranta ja muut, 2019).

NO_x-päästöt 85 % kuormituksella laboratoriossa tehdyllä mittauksella olivat maakaasulla noin 2,7 g/kWh, joka oli huomattavasti alempi kuin MDO:n 9,0 g/kWh ja MGO:n 10,0 g/kWh. Myös Anderson ja muut (2015) saavuttivat huomattavia vähennyksiä PM- ja NO_x-päästöissä LNG:n käytöllä DF-moottorissa risteilyaluksessa. PM-päästöt liikkuivat 0,2–0,4 mg/kWh alueella. Hiukkaspartikkelien arvellaan muodostuneen voiteluaineen palamisesta, kuten Lehtorannan ja muut (2019) tutkimuksessa. NO_x-päästöt pysyivät alle 1 g/kWh. Corbin ja muut (2020) saavuttivat samanlaisia tuloksia DF-moottorilla varustetulla aluksella. LNG käytöllä yli 25 % kuormituksella orgaaninen PM oli 4,4 ± 1,7 mg/kWh ja BC 0,8 ± 0,2 mg/kWh (Kuva 10). Tutkimuksessa PM-päästöjen arvioitiin olevan peräisin pilottipolttoaineena käytetystä dieselistä ja voiteluaineen palamisesta.



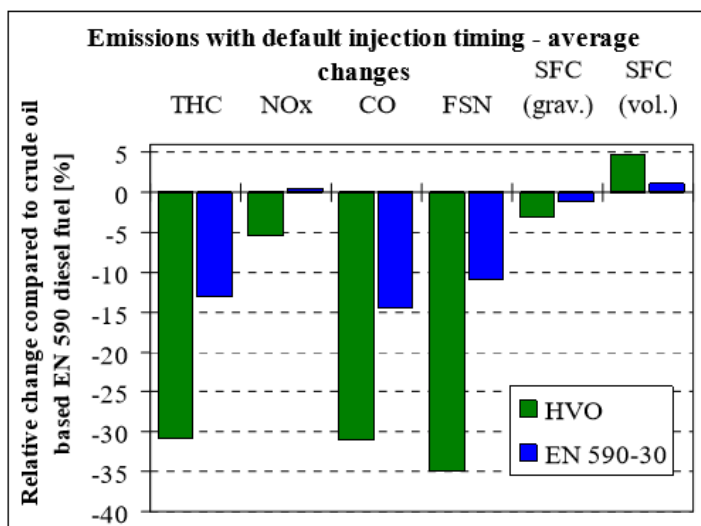
Kuva 10. LNG:n ja dieselpolttoaineen hiukaspäästöjen koostumus ja arvot (Corbin ja muut, 2020).

Moottorin voiteluaineen valinta on hankalaa, koska DF moottorissa käytettävien dieselin ja kaasupolttoaineen ominaisuudet ovat erilaisia. Korkean kokonaisemäsluvun (TBN 30-40 mg/g) omaavia voiteluaineita käytetään polttoaineiden kanssa, joiden rikkipitoisuus on 3,5 %. Tämän tarkoitus on neutralisoida esimerkiksi polttoaineen rikistä peräisin olevia rikkihappoja, jotka aiheuttavat korroosiota moottorin metallipintoihin. Matalan kokonaisemäsluvun (TBN 5 mg/g) omaavaa voiteluainetta käytetään LNG-polttoaineelle, jonka rikkipitoisuus on 0 %. DF-moottorissa käytetään pilottipolttoaineena useasti MDO:ta, jolla voidaan myös ajaa moottoria. Korkean TBN:n omaavan voiteluöljyn käyttö LNG ajossa aiheuttaa emäksisen ainesosan palamisen jäännöksen kertymistä sylinterin pinnoille. Tästä seuraa palamislämpötilan nousua. Voiteluaineen täytyy vähintään täyttää pilottiaineen vaatimukset emäksisyydessä (Okubo ja Takuya, 2019, s. 213–214; CIMAC, 2014).

4.4 Vetykäsittely kasviöljy (HVO)

Kasviöljyn vetykäsittely (HVO) on moderni tapa tuottaa korkealaatuista dieselpolttoainetta. HVO tunnetaan myös nimellä uusiutuva diesel. HVO:ta voidaan valmistaa laajasta valikoimasta kasviöljyjä ja eläinten rasvaa. HVO:t ovat kemiallisesti sekoitus parafiinihiilivetyjä ja eivät sisällä rikkiä, happea tai aromaatteja. HVO:ta voidaan sekoittaa dieselpolttoaineen sekaan tai käyttää sellaisenaan. HVO ei aiheuta ongelmia moottorille tai pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmille ja sen käyttö laskee päästöjä verrattuna korkealaatuiseen rikittömään dieselpolttoaineeseen. HVO sekoitettuna dieselpolttoaineeseen nostaa polttoaineen setaanilukua ja laskee aromaattipitoisuutta. Tämä laskee pakokaasupäästöjä, parantaa palamista ja kylmäominaisuuksia (Mikkonen, 2008; Aatola, Larmi, Sarjovaara, 2008).

Aatola ja muut (2008) tutkivat HVO:n käytön vaikutuksia raskaan dieselmoottorin päästöihin. Mitatut päästöt olivat CO, THC, NO_x ja savutus (FSN). Jälkikäsittelyjärjestelmiä ei käytetty tutkimuksessa. Käytetyt polttoaineet olivat 100 % HVO ja polttoaineseos (EN 590-30), joka koostui 30 % HVO:sta ja 70 % rikittömästä dieselpolttoaineesta (EN 590). Rikittöntä dieselpolttoainetta käytettiin myös referenssipolttoaineena. Tutkimuksessa havaittiin selviä vähennyksiä (Kuva 11) kaikissa mitatuissa päästöissä 100 % HVO:lla verrattuna rikittömään referenssipolttoaineeseen. Savutuksen määrä väheni noin 35 % ja NO_x väheni noin 5 %. Myös EN 590-30 polttoaineella havaittiin n. 11 % vähennys savutuksen määrässä, mutta NO_x-päästöt pysyivät samana. NO_x-päästöt liikkuvat 2–5 g/kWh alueella. THC- ja CO-päästöt laskivat myös, vaikka havaitut päästöt olivat niiden osalta jo valmiiksi alhaiset.

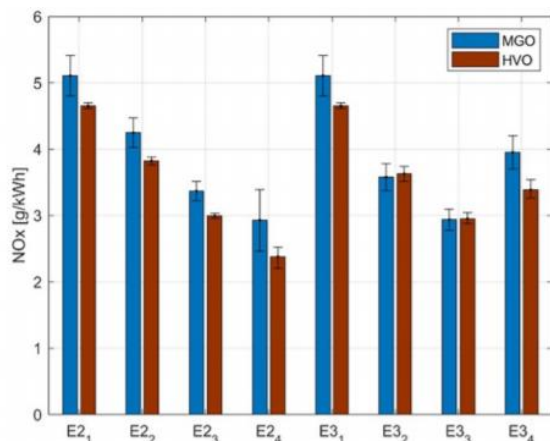


Kuva 11. HVO ja EN 590-30 päästöt verrattuna EN 590 (Aatola ja muut, 2008).

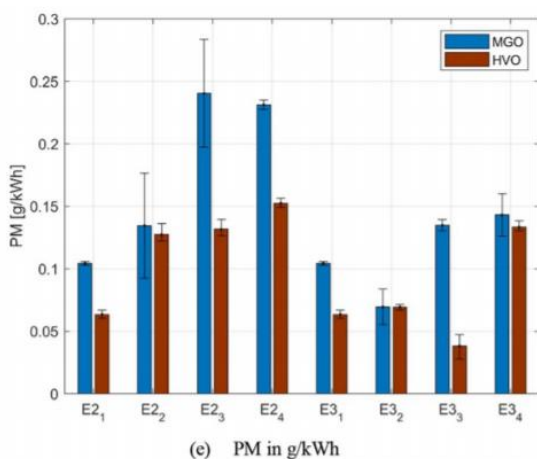
HVO soveltuu meriliikenteen käyttöön, sillä polttoaine ei sisällä rikkiä, joten sen sekoittaminen meripolttoaineeseen laskee SO_x-päästöjä. HVO:n käyttö vähentää PM-päästöjä myös kaikissa kokoluokissa. Korkean setaaniluvun takia palaminen paranee ja NO_x-päästöt laskevat. Setaaniluku vaikuttaa myös myönteisesti varastointiominaisuuksiin ja kylmäominaisuuksiin. HVO soveltuu käytettäväksi vaativissa olosuhteissa, kuten arktisissa olosuhteissa, sillä kylmäkäynnistyssavutus vähenee ja päästöt talviolosuhteissa laskevat. (Tyrolova ja muut, 2017; Aatola, Larmi, Sarjovaara, 2008; Neste Renewable Diesel Handbook, 2016).

Ushakov ja Lefebvre (2019) tutkivat HVO:n käyttöä vaihtoehtoisena meripolttoaineena. Raskasta nopeaa dieselmoottoria ajettiin MGO:lla ja HVO:lla. HVO:n käytöllä havaittiin NO_x-päästöjen osalta noin 10–15 % vähennys verrattuna MGO:hon tai ne pysyivät muuttumattomina. NO_x-päästöt liikkuvat HVO:ta käytettäessä 2–5 g/kWh välillä (Kuva 12). Noin 30 %:n vähennys havaittiin PM-päästöissä verrattuna MGO:hon. PM-päästöt HVO:lla liikkuvat 0,05–0,15 g/kWh välillä. THC-päästöissä havaittiin noin 55 %:n lasku käytettäessä HVO:ta, ja niiden mitattiin olevan 0,01–0,03 g/kWh välillä. CO- ja CO₂-päästöt HVO-käytössä olivat 0,5–1,5 g/kWh ja 500–650 g/kWh k ja niiden osalta havaittiin vain hyvin pieni vähennys verrattuna MGO-käyttöön. Myös Ovaska ja muut (2019) ja

Hissa ja muut (2015) havaitsivat alhaisimmat NO_x-päästöt HVO:lla vaihtoehtoisia meripolttoaineita koskevissa tutkimuksissaan.



Kuva 12. NO_x-päästöt MGO ja HVO (Ushakov ja Lefebvre, 2019).



Kuva 13. PM-päästöt MGO ja HVO (Ushakov ja Lefebvre, 2019).

4.5 Polttoaineen ja voiteluöljyn vaikutus jälkikäsittelykomponentteihin

DPF on paljon herkempi polttoaineen ja voiteluaineen vaikutukseen kuin SCR-katalysaattori. Hiukkassuotimien toimintaperiaate pakottaa pakokaasun suodatinmateriaalin läpi keräten kiinteän materiaalin, mukaan lukien tuhkan. Pidemmän toiminta-ajan saavuttamiseksi tuhkanpuhdistuksen välissä, tuhkan pääsy suodattimeen pitää minimoida. Polttoaineen ja voiteluöljyn tuhka on huomioitava varustaessa moottoria DPF-komponentilla. Polttoaineita tarkastellessa perinteisen raskaan polttoöljyn käyttö ei ole vaihtoehto sen

sisältämän korkean rikkipitoisuuden vuoksi, vaan pitää siirtyä käyttämään tisleitä. Voiteluaineiden osalta pitää käyttää matalan tuhkapitoisuuden omaavia Low-SAPS (Sulphated Ash, Phosphorus and Sulphur) voiteluöljyjä (Christianen ja muut, 2019, s. 11–12). Tuhkan varastoitumisen takia DPF-komponenttien koko on suuri, mikä vaikeuttaa DPF:n sijoittamista konehuoneeseen ja lisää myös energian tarvetta DPF:n aktiiviseen regenerointiin (Buccholz ja muut, 2016, s. 5)

4.6 Yhteenveto

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 6) on esitetty vertailtavien polttoaineiden päästöjen vaihteluvälit. Arvot on koottu aikaisemmin esitellyistä tutkimuksista. Taulukon arvot on suuntaa antavia, eikä niissä oteta huomioon erilaisia päästöihin vaikuttavia tekijöitä, kuten moottoreiden ominaisuuksia tai mittaustekniikkaa. Ylimmällä rivillä on esitetty tavoitteena olevat Euro VI rajat.

Taulukko 6. Polttoaineiden päästöarvot.

	PM g/kWh	NO _x g/kWh	CO g/kWh	HC g/kWh
Euro VI	0,01	0,40	1,5	0,13
MGO	0,05-0,25	5,0-9,0	0,28-0,3	0,16-0,4
ULSFO	0,03–0,04	13,3	~0,4	0,02
HVO	0,05-0,15	2-8,9	0,5-1,5	0,01-0,03
LNG	0,0002-0,02	0,5-2,7	1,4-1,7	1,1

Huomattavimmat vähennykset PM- ja NO_x-päästöjen osalta saavutetaan LNG:llä, jolla päästään alle halutun PM 0,01 g/kWh arvon ja hyvin lähelle NO_x 0,40 g/kWh arvoa. Toisaalta CO ja HC päästöt ovat LNG:llä korkeammat kuin MGO:lla. ULSFO ja HVO polttoaineilla saavutettavat vähennykset päästöarvoissa verrattuna MGO:hon ovat niin vähäisiä, että niiden hyödyntämisestä Euro VI -tavoitteessa ei olisi hyötyä. Voidaan todeta, että millään tutkituista vaihtoehtoisista polttoaineista ei yksinään täysin saavuteta haluttua Euro VI -päästönormia.

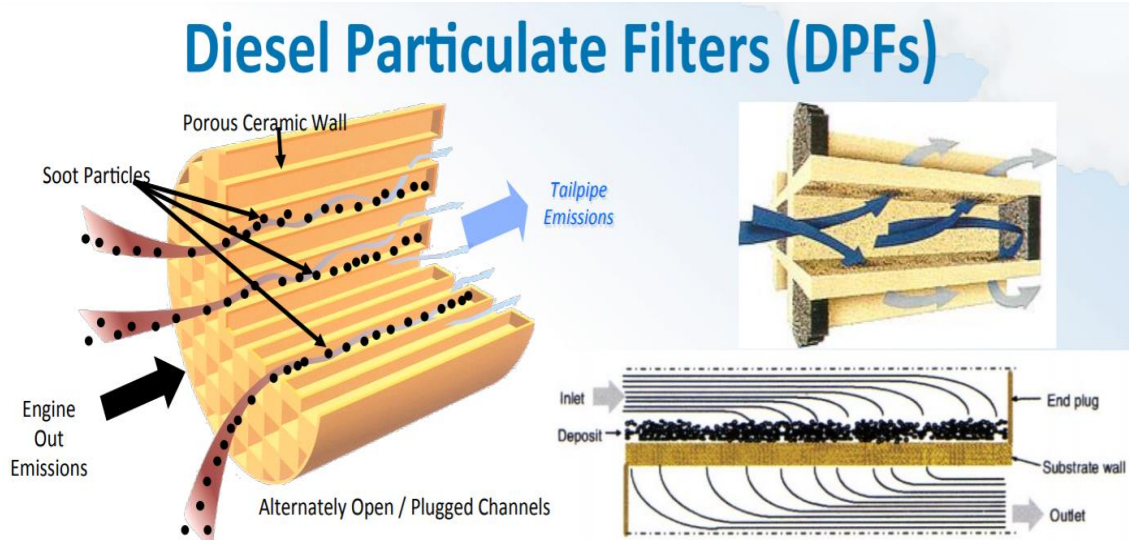
5 Pakokaasujen jälkikäsittely

Tässä luvussa esitellään dieselmootoreiden jälkikäsittelyjärjestelmistä hiukkassuodattimen (DPF), selektiivisen katalyyttisen pelkistykseen (SCR) ja pakokaasujen takaisinkierrätyksen toimintaperiaatteet. DPF- ja SCR-komponenttien hyödyntämistä ja niiden aiheuttamia ongelmia laivakäytössä esitetään. Pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän aiheuttaman vastapaineen vaikutuksia kuvaillaan ja esitetään tekniikoita, joilla vastapainetta saadaan kompensoitua.

5.1 Hiukkassuodatin

Hiukkassuodatin eli DPF (Diesel Particulate Filter) on pakokaasujen jälkikäsittelylaite, jolla ehkäistään PM-päästöjen vapautumista ilmakehään. Niiden toiminta perustuu hiukasia suodattavaan huokoiseen materiaaliin, jonka läpi pakokaasu virtaa. Kaasuna virtaavat molekyylit pääsevät läpi, mutta kiinteät hiukkaset tarratuvat kiinni. Parhaimmillaan ne suodattavat 90–98 % hiukkaspäästöistä pakokaasuvirrasta (Majeswki & Khair, 2006, s. 259–260; Günther, 2018, s. 28).

Täysvirtausuodattimen toiminta on esitetty kuvassa 14. Se on yleisin käytetty hiukkasten suodatustekniikka dieselmootoreissa. Täysvirtasuodatin koostuu keramiikkarungosta, joka sisältää virtauskanavia, jotka ovat tukittuna takapäädystä. Tämä pakottaa pakokaasun virtaamaan huokoisen keramiikkamateriaalin läpi, johon kiinteät hiukkaset tarratuvat kiinni. Kyseisellä tekniikalla pystytään suodattamaan häiriöttömässä tilassa 98 % läpi virtaavista nokihiukkasista (Günther, 2018, s. 28). Suodattimeen kerääntyneet hiukkaset nostavat sen aiheuttamaa vastapainetta, joten suodattimen puhdistamista tai regenerointia tarvitaan.



Kuva 14. Keraamisen täysvirtaussuodattimen toiminta (Geller, 2016)

5.1.1 Regenerointi

Hiukkassuodattimet pystyvät pidättelemään vain tietyn määrän nokea. Jos suodatin ylikuormittuu, se voi tukkeutua ja aiheuttaa vastapainetta, joka aiheuttaa ongelmia moottorin toiminnalle ja nostaa polttoaineen kulutusta (Majewski & Khair, 2006; Jääskeläinen). Regeneroinnilla eli puhdistuspoltolla tarkoitetaan hiukkassuodattimen puhdistamista siihen kertyneestä noesta hapettamalla noki kaasumaisiksi tuotteiksi. Hiukkassuodattimien regenerointi lämmön avulla vaatii 550–650°C asteen lämpötilan. Pakokaasun lämpötila ei normaalisti saavuta tarvittavaa lämpötilaa, jotta regenerointi voisi tapahtua. Tästä syystä regenerointia avustetaan nostamalla pakokaasun lämpötilaa, laskemalla noen syttymislämpötilaa katalyyttisen pinnoitteen avulla tai laskemalla noen syttymislämpötilaa herkästi reagoivan hapettajan avulla (Majewski ja Khair, 2006).

Pakokaasun lämpötilaa saadaan nostettua niin sanotulla pakotetulla regeneroinnilla, johon kuuluvat seuraavat tekniikat:

- Sähkölämmittimet
- Polttoainepolttimet
- Mikroaaltolämmitys
- Palavan aineen ruiskuttaminen pakokaasujärjestelmään (Majewski ja Khair, 2006)

Pakokaasun lämpötilan avulla regeneroivien järjestelmien pitää nostaa lämpötilaa 600–700°C asteeseen. Energian säästämiseksi regenerointi tapahtuu jaksollisesti. Tämä tapahtuu käyttämällä elektronista tunnistinta, joka käynnistää regeneroinnin, kun tietty määrä nokea on kertynyt suodattimeen (Majewski ja Khair, 2006). Pakotetussa regeneroinnissa käytetyt järjestelmät ovat monimutkaisia, kalliita ja nostavat polttoaineen kulutusta huomattavasti. Tästä syystä on kehitetty luonnollisesti regeneroituvia järjestelmiä (Pundir, 2017). Noen palamislämpötilan laskeminen katalyyttisen pinnoitteen avulla tai lisääneiden avulla kutsutaan luonnolliseksi regeneroinniksi. Kyseistä tekniikkaa käyttämällä saadaan suodatin regeneroitumaan pakokaasun normaalissa lämpötilassa. Katalyyttiset pinnoitteet voivat koostua platinasta, hopeasta, kuparista, vanadiinista, raudasta, molybdeenistä, mangaanista, kromista ja nikkelistä. Kyseisiä metalleja käyttämällä katalyyttisessä pinnoitteessa saadaan suodatin regeneroitumaan noin 325–420°C asteen välillä. Polttoaineeseen lisättävillä lisäaineilla regenerointi tapahtuu hieman alemmissa lämpötiloissa, noin 300–400°C asteessa. (Majewski ja Khair, 2006).

DPF:n käytöstä meriliikenteessä löytyy vähän tutkimustuloksia. Aakko-Saksa (2018) kuvailee ongelmiksi meriliikenteen käyttämiä polttoaineita, suodattimen suurta kokoa ja sen aiheuttamaa suurta vastapainetta. Meriliikenteestä peräisin oleva PM sisältää metallioksideja ja sulfaatteja, jotka ovat palamattomia. Tämän takia ajoneuvotekniikassa hyödynnettyjä regenerointitekniikoita ei voida käyttää. Lisäksi meridieselmoottoreiden lämpötila ei ole tarpeeksi suuri polttamaan nokea. Meridieselmoottoreissa DPF:n aiheuttama siedettävä vastapaine turbon toiminnalle on matala noin 30–50 mbar, verrattuna tieliikenteeseen, jossa siedettävä vastapaine voi olla jopa 100 mbar. Meriliikenteessä käytettävien suodattimien suuri koko on myös ongelma.

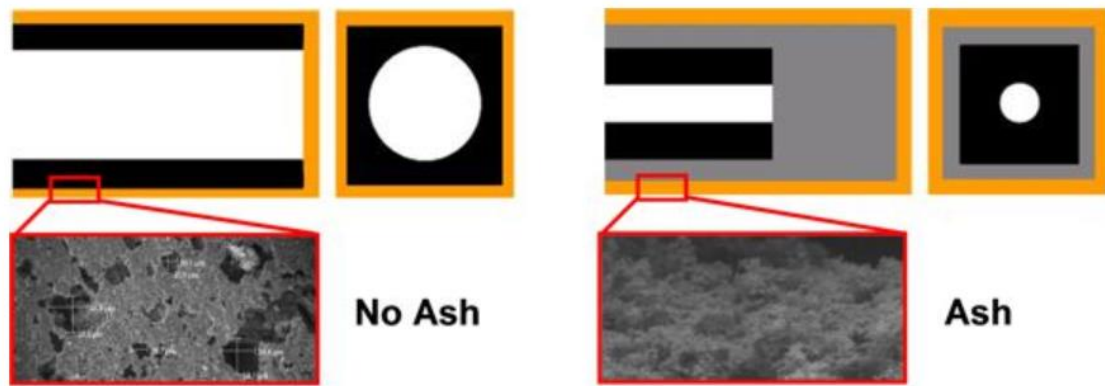
Lauer (2012) kuvailee tutkimustaan DPF:n hyödyntämisestä nelitahtimoottorissa ensimmäiseksi kaupallisessa merellä liikkuvassa aluksessa. Tankkeri operoi tutkimuksessa ECA-alueella ja käytti matalarikkistä DM-A-luokan polttoainetta. Aluksessa käytetty 950 x 770 x 1200 mm DPF hyödynsi polttoainepoltinta regenerointiin. Saavutettu PM vähennys oli

noin 98 %. Vastapaine oli <80 mbar 100 % kuormituksella. 700 h operoinnin jälkeen vastapaineraja ylittyi suodattimeen kertyneen tuhkan takia. Vastapaine nousi 80 mbar asti 50–60 % kuormitusalueella, jolla vastapainetaso ennen tukkeutumista oli 30 mbar. Alkuainehiili (EC, elemental carbon) vähentyi 99 %, orgaaninen hiili (OC, organic carbon) 30–60 % ja sulfaatit 40–60 %. Kokonais-PM vähennys oli 55 % ja US-EPA Tier-4 PM -rajaa 0,04 g/kWh ei saavutettu.

Queen Victoria risteilijäaluksessa käytettiin katalysoitua Pd, V₂O₅/SiC suodatinta Wärtsilän 8,6 MW nelitahtimoottorissa, jossa polttoaineena käytettiin 1% S HFO:ta. Tutkimuksessa saavutettiin 80–92 % PM-vähennykset, riippuen moottorin kuormituksesta. Tuhka ja loput hiilestä puhdistettiin pulssimaisesti paineilmalla 10 tunnin välein, joka piti DPF:n vastapaineen noin 30 mbarissa. Haluttu 1 mg nokea/m³ pakokaasussa saavutettiin (Johansen, 2015).

5.1.2 DPF ja tuhka

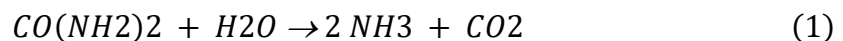
Tuhkan kerääntyminen DPF komponenttiin on huomattava haittatekijä sen toiminnalle. Tuhka kertyy kanavan pinnalle ja on merkittävä tekijä vastapaineen nousulle, sille se vaikuttaa suodattimen kanavan muotoon. DPF kanavaan kertynyt tuhka vie suuren osan sen tilavuudesta korvaten noen, kuten kuvassa 15 on esitetty. Tällä on vaikutus polttoaineen kulutukseen vastapaineen nousun kautta, sekä regenerointivälin lyhentymiseen (Sappok, 2013; Sappok & Wong 2010).



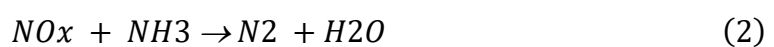
Kuva 15. Tuhkan kertyminen DPF-kanavaan (Sappok, 2013).

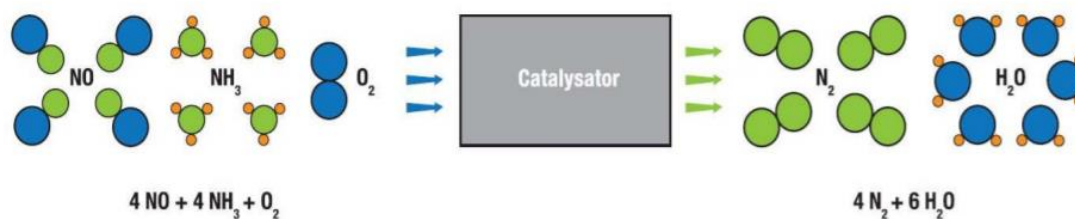
5.2 SCR-katalysaattori

SCR-katalysaattori on pakokaasujen jälkikäsitteilylaite, joka muuntaa noin 90 % NO_x -päästöistä typeksi ja vedeksi. SCR tarkoittaa selektiivistä katalyyttistä pelkistämistä. Kyseisessä tekniikassa käytetään ammoniakkia pakokaasun seassa muuntamaan NO_x -päästöt katalysaattorin sisällä harmittomaksi typeksi ja vedeksi. Ammoniakki on myrkyllinen aine, jota täytyy käsitellä varovasti, jotta siitä ei kohdistuisi vaaraa laivan miehistölle, matkustajille tai ympäristölle. Tästä syystä laivoissa käytetään vaaratonta ureavesiliuosta, jota ruiskutetaan pakokaasun sekaan. Urea hajoaa kuumassa pakokaasussa ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi:



Seuraavaksi ammoniakki reagoi pakokaasun typenoksidien kanssa SCR-katalysaattorissa katalyyttisen pinnoitteen päällä, jossa nämä pelkistyvät typeksi ja vesihöyryksi (Ghünter, 2018 s. 46: Majeskwi & Khair, 2006, s. 418: Tinschmann ja muut, 2010, s. 8):





Kuva 16. Kuvaus SCR-katalysaattorin kemiallisesta prosessista (Tinschmann ja muut, 2010).

SCR-järjestelmän soveltamisessa meridieselmoottorin pakokaasujärjestelmään on otettava huomioon pakokaasun lämpötila ja rikin oksidit. Alle 300°C ammoniakki (NH_3) reagoi rikin oksidien kanssa muodostaen ammoniumvetysulfaattia ($(\text{NH}_4)\text{HSO}_4$) ja ammoniumsulfaattia ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). Molemmat aiheuttavat SCR-katalyyttien rappeutumista ja laskevat niiden toimintakykyä. Liian suurilla lämpötiloilla yli noin 450°C katalyytti alkaa hajoamaan. (Okubo ja Kuwahara, 2019, s. 148–149; Majewski ja Khair, 2006, s. 417).

Erilaisia SCR-katalyyttejä ja niiden vaatimat lämpötilat toimintakyvyille:

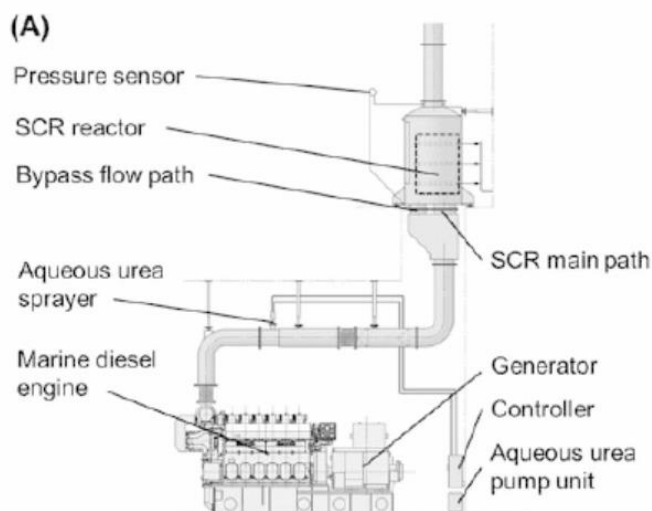
- Platina (Pt) (145-250°C)
- Vanadiini (V_2O_5) (300-450°C)
- Zeoliitti (350-600°C)

V_2O_5 lämpötilavaatimus sopii parhaiten yhteen dieselmoottorien tuottamien pakokaasujen lämpötilojen kanssa. Sen toiminta matalassa lämpötilassa ei ole riittävää, kun dieselmoottori operoi matalilla kuormituksilla. Katalyytin toimintaa matalassa lämpötilassa voidaan parantaa lisäämällä katalyytin volyyymia tai nostamalla NO_2 määrää pakokaasussa, esimerkiksi hapettavalla katalysaattorilla. NO_2 on todettu parantavan V_2O_5 aktiivisuutta matalissa lämpötiloissa (Majewski ja Khair, 2006, s. 419–420).

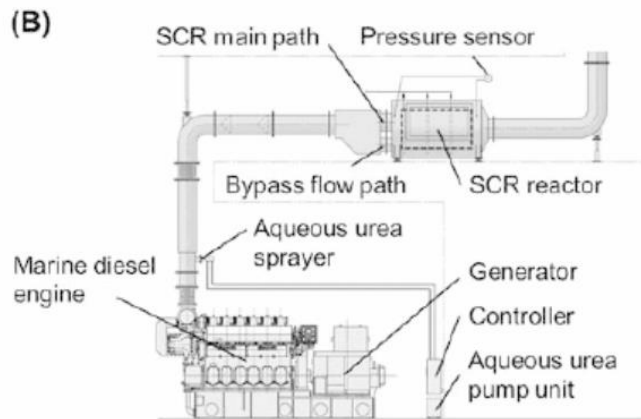
Meriliikenteen käyttöön tarkoitettu SCR- systeemi koostuu tyypillisesti:

- SCR-katalyyteista, jotka ovat vaihdettavissa
- Reaktorin kotelosta, jossa katalyytit sijaitsevat
- Ureasäiliöstä
- Urean pumppausjärjestelmästä
- Urean annosteluyksiköstä
- Urean ruiskutusjärjestelmästä
- Urean ja pakokaasun sekoitusputkesta, jossa on urean ruiskutuspiiste
- Noen ja tuhkan puhdistus järjestelmästä
- Ohjausjärjestelmästä (Cattaneo, 2018; Floyd's Register, 2012)

SCR-reaktorin sijoittaminen turbon suhteen riippuu siitä, käytetäänkö hidasta vai keski-nopeaa moottoria. Hidaskäyntisissä moottoreissa SCR-reaktori sijoitetaan ennen turboa, koska lämpötila turbon jälkeen on hyvin matala. Näin saadaan SCR- järjestelmä operoimaan halutulla tavalla (Cattaneo, 2018). SCR-järjestelmä voidaan sijoittaa konehuoneeseen pysty- tai vaakatasossa (Kuvat 17 ja 18) riippuen käytettävissä olevasta tilasta (Okubo & Kuwahara, 2019, s. 149–150).



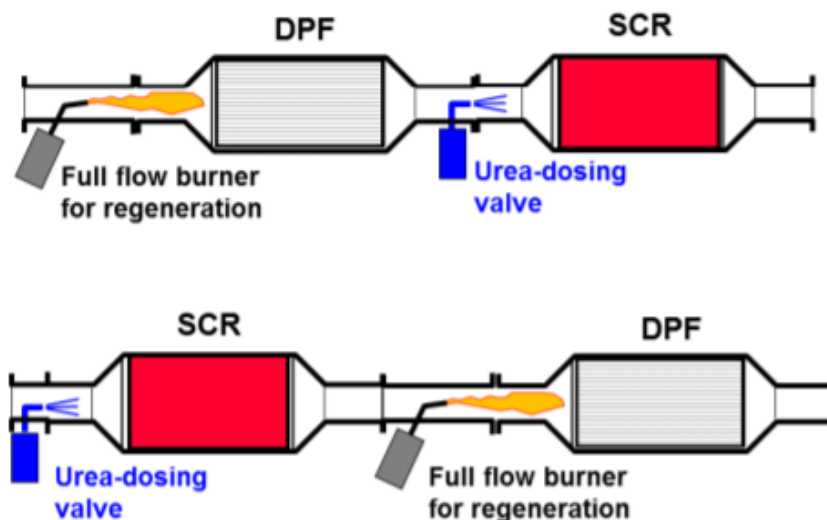
Kuva 17. SCR-järjestelmä pystysuunnassa (Okubo & Kuwahara, 2019).



Kuva 18. SCR-järjestelmä vaakasuunnassa (Okubo & Kuwahara, 2019).

5.3 DPF:n ja SCR:n soveltaminen merikäyttöön

SCR- ja DPF-komponenttien soveltaminen suurempiin meridieselmootoreihin ei välttämättä toteudu tieliikenteestä peräisin olevalla layoutilla (Kuva 19). Kyseisiä komponentteja hyödyntäessä meridieselmootoreihin täytyy ottaa huomioon SCR:n vaatima korkea pakokaasun lämpötila luotettavalle operoinnille ja DPF:n vaatima lämpötila regenerointia varten (Buchholz ja muut, 2016).



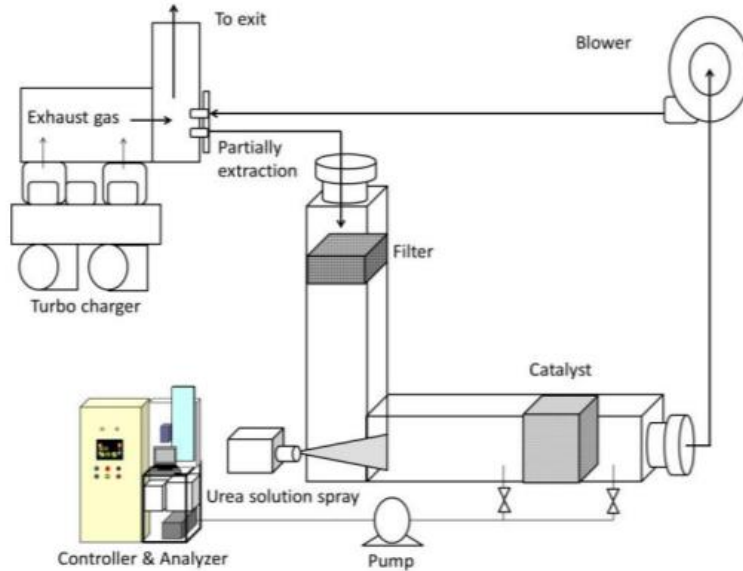
Kuva 19. Vaihtoehtoisia asetteluja SCR- ja DPF-komponenteille (Buchholz ja muut, 2016).

DPF:n sijoittaminen ennen SCR-katalysaattoria on todettu toimivimmaksi ratkaisuksi. Tällöin SCR-katalysaattorin läpi virtaa puhtaampaa pakokaasua, joka vaikuttaa kompaktim-
paan muotoiluun (Christianen ja muut, 2019, s. 13). Lao ja muut (2020) toteavat asette-
lun, jossa DPF sijoitetaan ennen SCR:rää olevan hyödyllisempi regenerointistrategian
kannalta. Näin suodatin saadaan regeneroitumaan passiivisesti korkeassa pakokaasun
lämpötilassa. Tästä syystä suodatin sisältää vähemmän nokea, mikä voi laskea polttoai-
neenkulutusta, koska aktiiviseen regenerointiin ei vaadita niin paljoa energiaa. DPF voi
estää SCR:n likaantumista. Haittana voidaan pitää SCR altistumista suurille lämpötiloille
aktiivisen (pakotetun) regeneroinnin aikana. SCR-katalyytti saadaan lämpiämään nope-
ammin, kun DPF sijoitetaan mahdollisimman lähelle moottoria. Näin DPF operoi korke-
ammassa lämpötilassa ja SCR-katalyytin lämpötila pysyy tarpeeksi korkeana, jotta sen
NO_x-muunnoskyky pysyy mahdollisimman tehokkaana (Pundir, 2017, s. 295).

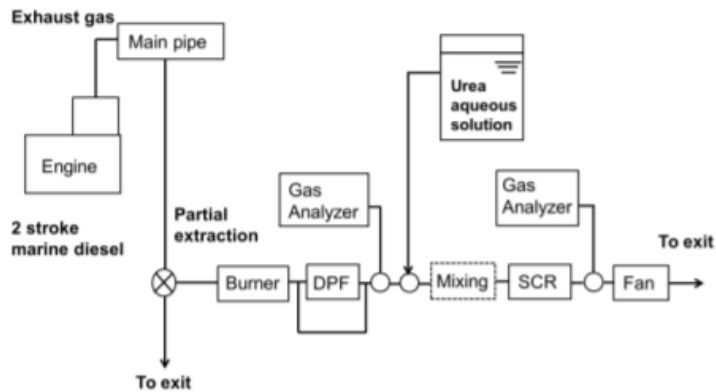
The Cleanest Ship -projektissa käytettiin matalarikkistä tieliikenteen EN590 standardin
täyttävää polttoainetta (0.001 % S) ja samaan reaktoriin yhdistettyä SCR- ja DPF-tekniik-
kaa NO_x- ja PM-päästöjen vähennykseen säiliöaluksessa. Järjestelmässä käytettiin 33 %
urea-vesiliuosta ja täysvirtaushiukkassuodatinta, joka oli päällystetty piikarbidi (SiC) ka-
talyyttipinnoitteella, jonka avulla suodatin saatiin regeneroitumaan 450°C asteessa il-
man pakotettua regenerointia. Tutkimuksessa saavutettiin NO_x-päästöjen osalta par-
haimmillaan 90 % vähennys, jolloin päästöt olivat noin 2,2–0,8 g/kWh. Parhaimmillaan
esitetään saavutettavan Euro VI 0,4 g/kWh raja. PM-päästöjen osalta saavutettiin noin
0,004 g/kWh, jonka tutkimuksessa esitetään alittavan Euro VI asettaman PM- rajan 0,01
g/kWh (Schweighofer ja Blaauw, 2009). Tutkimuksessa esitetyt erittäin matalat PM-pääs-
töt voidaan arvella saavutettavan erittäin matalan (0,001 S %) rikkipitoisuuden sisältävän
dieselpolttoaineen ja hiukkassuodattimen yhteiskäytöllä.

Izumi ja muut (2013) muut tutkivat SCR-katalysaattorin toimintaa merellä liikkuvassa
aluksessa käyttäen polttoaineena HFO:ta sekä testiolosuhteissa käyttäen vähärikkistä
meridieselpolttoainetta. Molemmissa DPF sijoitettiin ennen SCR-katalysaattoria (Kuvat

20 ja 21). Testiolosuhteissa käytettiin myös poltinta ennen DPF:ää ylläpitämään haluttua pakokaasun lämpötilaa.



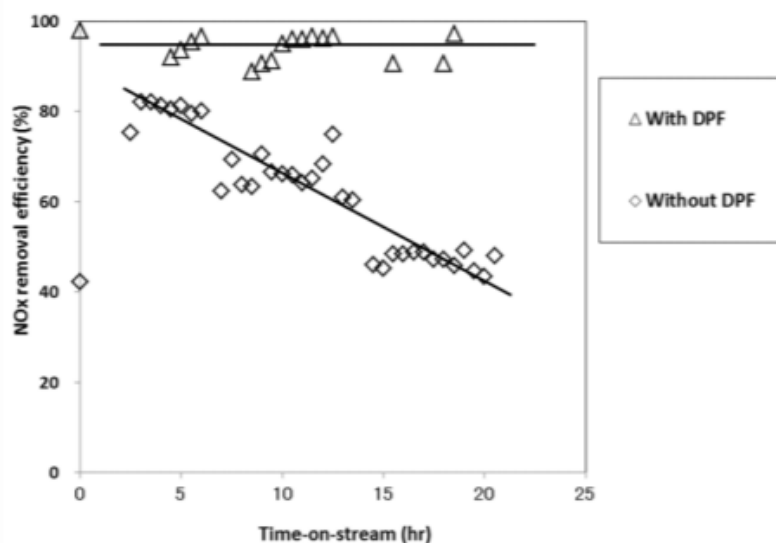
Kuva 20. DPF ja SCR layout merellä liikkuvassa aluksessa (Izumi ja muut, 2013).



Kuva 21. DPF ja SCR layout testiolosuhteissa. Polttimella ylläpidetään haluttua pakokaasun lämpötilaa (Izumi ja muut, 2013).

Laivassa tehdyt mittaukset osoittivat, että DPF poistaa tehokkaasti pakokaasusta noki- ja öljypartikkeleita, jotka muuten tukkisivat SCR-katalysaattoria ja haittaisivat sen toimintaa. DPF:n avulla saatiin pidettyä SCR-katalysaattorin NO_x poistotehokkuus noin 90 %:ssa (Kuva 22). Ilman SCR-katalysaattorin eteen sijoitettua DPF:ää NO_x poistotehokkuus

laski 80 %:iin ja noin 20 tunnin kuluttua tehokkuus oli enää 40 %. Testiolosuhteissa havaittiin tehokasta noki- ja öljypartikkeleiden vähennystä kuvassa esitetyllä layoutilla. DPF laski noen määrää noin 80 %. Pakokaasun noen määrä laski noin 30 % kulkiessa polttimen lävitse. Polttimella oli myös suuri vaikutus öljypartikkeleiden laskuun. Tutkimuksessa ei otettu huomioon jälkikäsitteilykomponenteista syntyneitä vastapaineita.

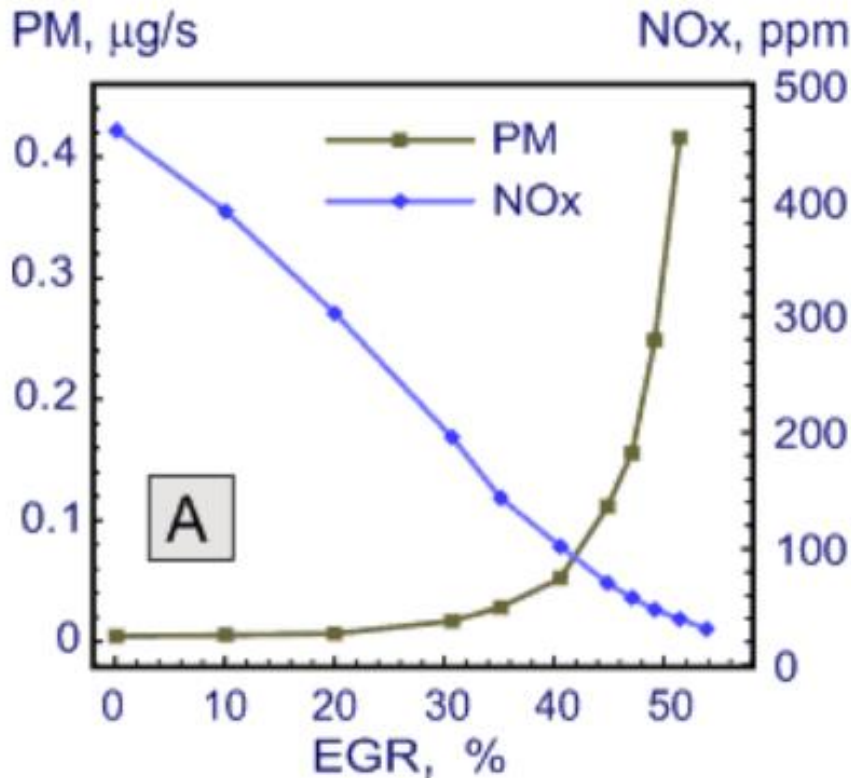


Kuva 22. SCR:n NO_x-vähennystehokkuus ilman hiukkassuodatinta ja suodattimen kanssa (Izumi ja muut, 2013).

5.4 EGR

Pakokaasujen takaisinkierätyks eli EGR (Exhaust Gas Recirculation) on NO_x-päästöjen vähentämiseen käytetty tekniikka. Siinä osa pakokaasusta viilennetään ja ohjataan takaisin ahtoilman sekaan uudelleen käytettäväksi palamisprosessissa. Kyseisessä prosessissa CO₂ korvaa palamisilmassa olevaa happea. Koska CO₂:lla on suurempi lämpökapasiteetti kuin O₂:lla, palamislämpötila laskee, mikä johtaa matalampaan typenoksidien muodostumiseen. Palamislämpötilan alentumisen lisäksi O₂ määrän vähentyminen palotilassa johtaa matalampaan NO_x-ien muodostumiseen myös sitä kautta, että happea on vähemmän reagoimassa typen kanssa. Kyseisen tekniikan haittana on se, että nokea muodostuu enemmän matalamman palamislämpötilan ja vähentyneen hapen vuoksi (Kock, 2019, s. 8).

Alla olevassa kuvassa 23 on esitetty EGR-suhteen vaikutus NO_x -PM trade-off ilmiöön. EGR-suhdetta ei voida kasvattaa noin 40 %:a suuremmaksi ilman, että PM-päästöt alkavat kasvamaan (Jääskeläinen & Khair, 2017).



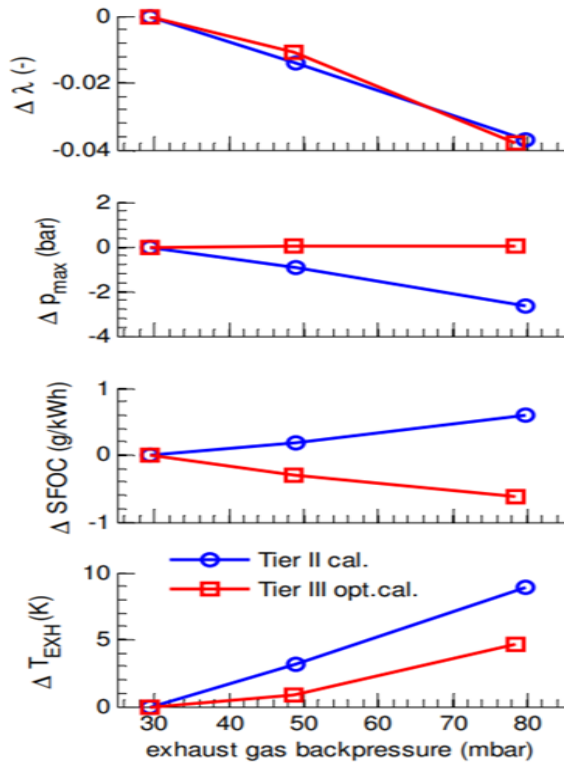
Kuva 23. EGR-suhteen vaikutus PM- ja NO_x -päästöihin (DieselNet, 2017)

5.5 Vastapaine

Jälkikäsitteilykomponentit pakokaasusysteemissä nostavat vastapainetta (Lloyd's Register, 2012). Vastapaineella tarkoitetaan moottorin tuottamaa pakokaasun painetta voidakseen ylittää pakokaasusysteemin tuottaman hydraulisen vastuksen, jotta pakokaasu voi vapautua ilmakehään (Jääskeläinen, 2007). Moottorivalmistajat ilmoittaman vastapainealueen ulkopuolella operointi voi johtaa nopeampaan kulumiseen, huoltovälin lyhentymiseen, tehon alentumiseen ja kasvavaan polttoaineen kulutukseen (Lloyd's Register, 2012).

Korkean vastapaineen vaikutukset ovat (Kuva 24) (Knafl ja muut, 2013, s. 9):

- Polttoaineen kulutus kasvaa
- Pakokaasun lämpötila ennen turbiinia kasvaa
- Ilman ja polttoaineen seoksen suhde (λ) laskee
- Maksimi sylinteripaine laskee

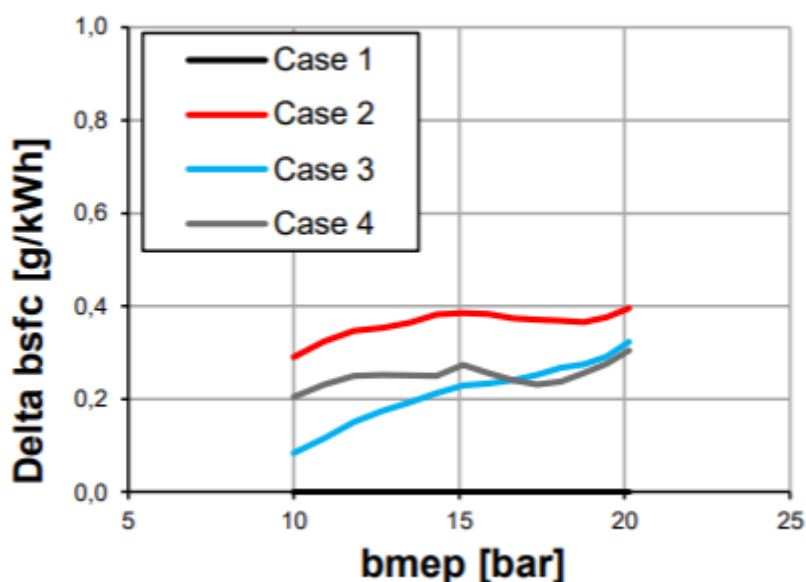


Kuva 24. Kasvavan vastapaineen vaikutus ilman ja polttoaineen suhteeseen, maksimisylinteripaineeseen, polttoaineen kulutukseen ja pakokaasun lämpötilaan ennen turbiinia (Knafl ja muut, 2013, s. 10).

Ilma-polttoaineseoksen suhteen lasku voi johtaa kasvavaan savutukseen (Majewski & Khair, 2006 s. 113). Kasvavan vastapaineen takia puristussytytteisessä moottorissa suuremman ominaislämpökapasiteetin omaavaa pakokaasua jää sylinteriin, jolloin palamislämpötila alenee ja NO_x -päästöt vähenevät. CO -päästöt kasvavat matalilla pyörimisnopeuksilla vastapaineen noustessa ja laskevat korkeilla nopeuksilla (Joardder ja muut, 2011).

Moottorin uudelleensuunnittelu operoimaan korkeammalla pakokaasujärjestelmän tuottamalla kokonaisvastapaineella on vaikein ja pisin lähestymistapa. Helpoin lähestymistapa pakokaasujärjestelmän tuottaman kokonaisvastapaineen kompensointiin on kasvattaa jälkikäsitteilykomponenttien kokoa (J. Ristimäki, henkilökohtainen keskustelu, 12.6.2020).

Kuvassa 25 on esitettyä turbon uudelleen sovituksella ja moottorin ruiskutus- ja pakoventtiilien ajoitusta muokkaamalla saavutettava hyöty vastapaineen aiheuttamaan lisääntyneeseen polttoaineen kulutukseen (Achillas ja muut, 2018).

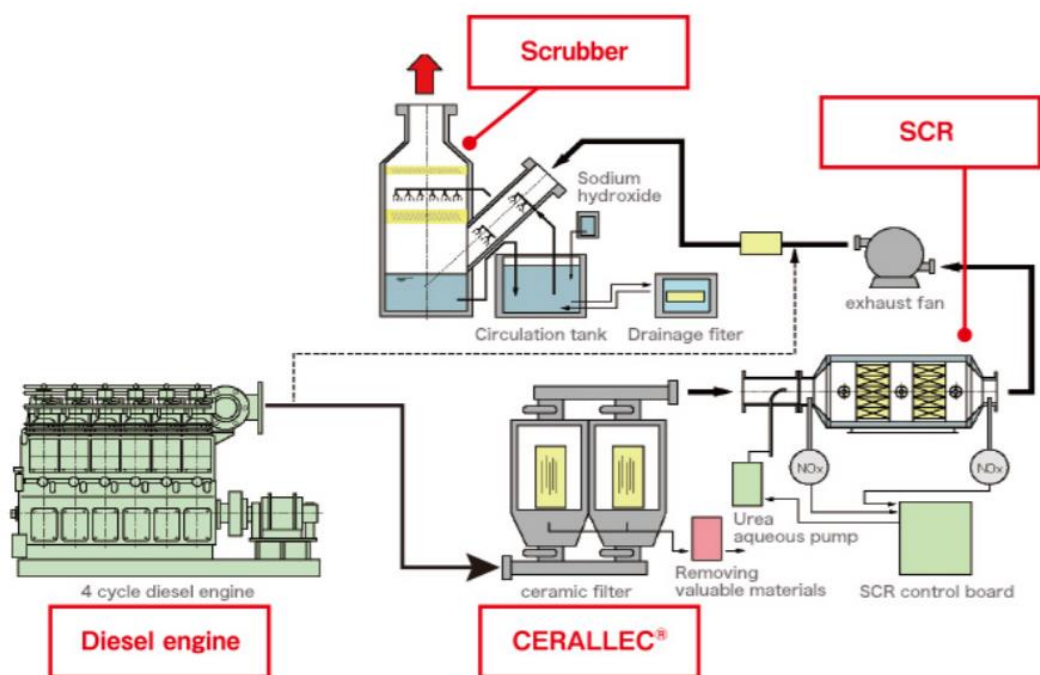


Kuva 25. Vastapaineen kompensointi turbon uudelleen sovituksella ja moottorin ruiskutus- ja pakoventtiilien ajoitusta muokkaamalla (Achillas ja muut), 2018.

Kuvassa Case 1 on referenssimoottori pakokaasusysteemin aiheuttamalla 30 mbar vastapaineella. Case 2 kuvaa referenssimoottorin polttoaineen kulutuksen nousua pakokaasusysteemin aiheuttamalla 60 mbar vastapaineella. Case 3 esittää turbon uudelleen sovituksella saavutettavan hyödyn polttoaineen kulutuksessa pakokaasujärjestelmän 60 mbar vastapaineella. Case 4 esittää ruiskutus- ja pakoventtiilien ajoitusta muokkaamalla saavutettavan hyödyn polttoaineen kulutukseen pakokaasujärjestelmän 60 mbar vasta-

paineella. Turbon uudelleen sovitus on tehokkaampi tapa kompensoida polttoaineen kulutusta kuin moottorin ruiskutus- ja pakoventtiilien ajoituksen muokkaaminen (Achillas ja muut, 2018).

Indusoidun tuulettimen käyttö pakokaasun puhdistusjärjestelmän yhteydessä kasvattaa pakokaasun poistumisnopeutta komponentista. Kyseinen tekniikka kasvattaa energian kulutusta, mutta on tehokas vaihtoehto moottorin asettamien vastapainerajoitusten täyttämiseen (EGSCA, 2012). DPF-komponentin käytön yhteydessä voidaan joutua käyttämään pakokaasutuuletinta, riippuen moottorivalmistajan ilmoittamasta maksimivastapaineesta (Nonokawa ja muut, 2016). Kuvassa 26 on esitettyä dieselmoottorin pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä, joka koostuu hiukkassuodattimesta, SCR-järjestelmästä ja rikkipesurista. Pakokaasutuuletin on asennettu SCR-reaktorin jälkeen kompensoimaan järjestelmän aiheuttamaa kokonaisvastapainetta (Takahashi ja Masuda, 2018).



Kuva 26. Pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmä, jossa vastapainetta kompensoidaan pakokaasutuulettimella (Takahashi ja Masuda, 2018).

6 Jälkikäsittelyjärjestelmä expedition-risteilijään

Expedition-risteilijän koneiston on tarkoitus koostua kahteen konehuoneeseen jaetusta dieselsähköisestä koneistosta, jonka yhteisteho on 11 000 kW. Projektiin kuuluu myös energiatehokkuuden kasvattaminen 20 %:lla referenssilaivaan nähden. Tätä varten pakokaasusysteemiin kuuluu myös pakokaasukattila, jolla pakokaasun sisältä lämpö saadaan talteen. Pakokaasukattila aiheuttaa noin 10 mbar vastapaineen ja sen jälkeen pakokaasun lämpötila on 230°C. Lämpötila on liian alhainen pakokaasujen jälkikäsittelykomponenteille, jotta ne saavuttaisivat tarvittavan operointilämpötilan.

Pakoputkisto on pyrittävä suunnittelemaan mahdollisimman suoraviivaiseksi vastapaineiden minimoimiseksi, joten teräviä kulmia on vältettävä putkistossa. Äänenvaimenninta (~10 mbar) ja pakokaasukattilaa käytettäessä pakokaasujärjestelmän putkisto saa aiheuttaa maksimissaan noin 10 mbar vastapaineen, jos moottorin ilmoitettu maksimivastapaine on 30 mbar.

Äänenvaimentimen yhdistämistä DPF- ja SCR-komponenttien kotelointiin tutkitaan mahdollisena ratkaisuna tilan säästämiseksi ja vastapaineiden pitämiseksi mahdollisimman alhaisena. Myös DPF- ja SCR- komponenteilla saavutetaan äänenvaimennusta. Pakokaasun lämpötila, komponenttien vaatima lämpötila ja moottorin sallittu maksimivastapaine ovat tärkeitä jälkikäsittelykomponenttien toimintaa tarkastellessa. Seuraavaksi kuvataan Euro VI-päästönormin saavuttamiseksi tarjotut kokonaisratkaisut eri laitevalmistajilta.

6.1 Kokonaisratkaisut

Projektiä varten tarkastellaan kolmelta eri valmistajalta saatuja kokonaisratkaisuja päästötavoitteen saavuttamiseksi. Kahden valmistajan ratkaisut koostuvat DPF- ja SCR-komponenteista. Kolmas valmistaja tarjoaa EGR-tekniikkaa hyödyntäviä moottoreita, jotka on suunniteltu täyttämään työkoneille tarkoitettua tiukkaa EPA Tier 4 päästöluokitusta. Kyseisillä moottoreilla ei saavuteta alhaista NO_x-päästörajaa aikaisemmin esitellyn NO_x-

PM trade-off ilmiön takia. PM-päästöjen osalta päästään hyvin lähelle haluttua arvoa. HC- ja CO-päästöjen osalta saavutetaan haluttu raja. Jotta kyseistä tekniikkaa voitaisiin hyödyntää Euro VI projektissa, pitäisi EGR:n lisäksi käyttää SCR-tekniikkaa NO_x-päästöjen osalta. Valmistaja ei pysty tarjoamaan muita jälkikäsittely komponentteja EGR:n lisäksi. Valmistaja kuvailee kyseisen tekniikan eduksi tilan säästön ja yksinkertaisemman järjestelmän verrattuna SCR-järjestelmään.

6.1.1 Valmistajan 1 tarjoama vaihtoehto

Valmistaja 1 tarjoaa DPF- ja SCR-komponentteja kolmelle eri keskinopealle IMO Tier II -päästöluokitusrajan täyttävälle moottorille. Projektiin sopiva koneisto koostuu kuudesta keskinopeasta turboahdetusta 4-tahti moottorista. Moottorin tiedot ovat esitettyinä alla olevassa taulukossa (Taulukko 7):

Taulukko 7. Valmistajan 1 moottorin tärkeimmät tekniset tiedot.

Sylinterin halkaisija	200 mm
Iskunpituus	280 mm
Iskutilavuus	8,8 l/sylinteri
Sylinteri konfiguraatio	8 rivi
Pyörimisnopeus	1200 rpm
Teho	1760 kW
Maksimi vastapaine	50 mbar
Pakokaasun lämpötila	325°C 85 % kuormituksella

Taulukossa 8 on esitettyinä kyseiselle moottorille sopivan DPF-komponentin tiedot.

Taulukko 8. Valmistajan 1 DPF tiedot.

Suodatintekniikka	Keraaminen täysvirtaussuodatin
Regenerointi	Poltin ja katalyyttipinnoite
Vastapaine	30 mbar
Lämpötilavaatimus	350°C
Hiukkassuodatus (PM)	<90 %
Regenerointiaikaväli	8 h
Tuhkanpuhdistusaikaväli, jos käytetään <0.5 S polttoainetta ja < TBN 15 voiteluöljyä	2500–4000 h
Paino	5078 kg
Tilavuus	~19 m ³

Katalyyttisen pinnoitteen avulla regenerointi saadaan alkamaan 420°C asteen lämpötilassa. Polttoainepolttimen avulla regenerointilämpötila pidetään 420–450°C asteessa. Tuhkanpuhdistus tapahtuu manuaalisesti syöttämällä paineilmaa komponenttiin. Komponentti toimii myös korkealuokkaisena äänenvaimentimena. Sillä saavutetaan 35 dB(A) vaimennus. Tarkempaa taajuusaluetta, jolla vaimennus tapahtuu ei ole ilmoitettu. Valmistaja ilmoittaa, että komponentin kokoa kasvattamalla saadaan laskettua vastapainetta. Projektiin sopivan 1760 kW moottorin DPF painaa 5078 kg ja on tilavuudeltaan noin 19 m³.

Valmistajan 1 tarjoama SCR- komponentti koostuu kahdesta katalyyttikerroksesta. Reaktorissa on paineilmayksikkö, jonka avulla se pidetään puhtaana noesta. Päästöarvojen saavuttamiseksi urean ja pakokaasun sekoitusputken pituus on 5–7 kertaa putken halkaisija. Projektin tapauksessa urean ja pakokaasun sekoitusputken halkaisija on 800 mm, joten suoraa putkea tarvitaan noin 4000–5600 mm, jotta urea ja pakokaasu saadaan sekoittumaan tehokkaasti NO_x-päästöarajan saavuttamista varten. SCR-järjestelmän tuotama vastapaine on 30–35 mbar. Valmistaja ilmoittaa, että kasvattamalla SCR-reaktoria

kaksi reaktorinkokoa saadaan vastapainetta vähennettyä 1 mbar. Valmistajan mukaan SCR-reaktori pitää asentaa pakokaasujärjestelmään ennen pakokaasukattilaa. Pakokaasukattilan puhdistukseen käytetty vesi ei saa päätyä SCR-reaktoriin. SCR-reaktorilla saavutetaan noin 8–12 dB(A) äänenvaimennus. Reaktoriin ja urean sekoitusputkeen voidaan yhdistää äänenvaimennin. Projektiin sopiva SCR-reaktori painaa 2500 kg ja on tilavuudeltaan noin 8,6 m³.

Moottoreiden maksimivastapaineeksi on ilmoitettu 50 mbar. 85 % kuormituksella pakokaasun lämpötila turbon jälkeen on 325°C. Polttoaineen kulutus kasvaa valmistajan mukaan noin 2,5 %, jos pakokaasujärjestelmä koostuu maksimikokoisesta pakokaasukattilasta, DPF- ja SCR-komponenteista, joiden oletetaan aiheuttavan 70 mbar vastapaine ilmoitetun sallitun 50 mbar sijaan.

6.1.2 Valmistajan 2 tarjoama vaihtoehto

Valmistajan 2 tarjoama ratkaisu koostuu neljästä 2800 kW keskinopeasta turboahdetusta 4-tahti dieselgeneraattorista ja jälkikäsitteilyjärjestelmästä, joka koostuu DPF- ja SCR-komponenteista. Moottorin ilmoitetaan olevan savuton ja saavuttavan huomattavaa polttoaineen säästöä alle 70 % kuormituksella. Valmistajan 2 ilmoittamat moottorin tekniset tiedot esitetään taulukossa 9 ja kyseiselle moottorille sopivan DPF:n tiedot taulukossa 10.

Taulukko 9. Valmistajan 2 moottorin tärkeimmät tekniset tiedot

Sylinterin halkaisija	255 mm
Iskunpituus	400 mm
Iskutilavuus	20,4 l/sylinteri
Sylinteri konfiguraatio	8 rivi
Pyörimisnopeus	720 rpm
Teho	2800 kW
Maksimi vastapaine	35 mbar
Pakokaasun lämpötila	330°C 85 % kuormituksella

85 % kuormituksella polttoaineen kulutus on 185 g/kWh. Pakokaasusysteemin tuottavaa vastapainetta voidaan nostaa 55 mbar asti seuraavasti:

- Pakokaasun lämpötila kasvaa 3 K per 10 mbar
- Polttoaineen kulutus kasvaa +0,33 g/kWh per 10 mbar

Taulukko 10. Valmistajan 2 DPF tiedot.

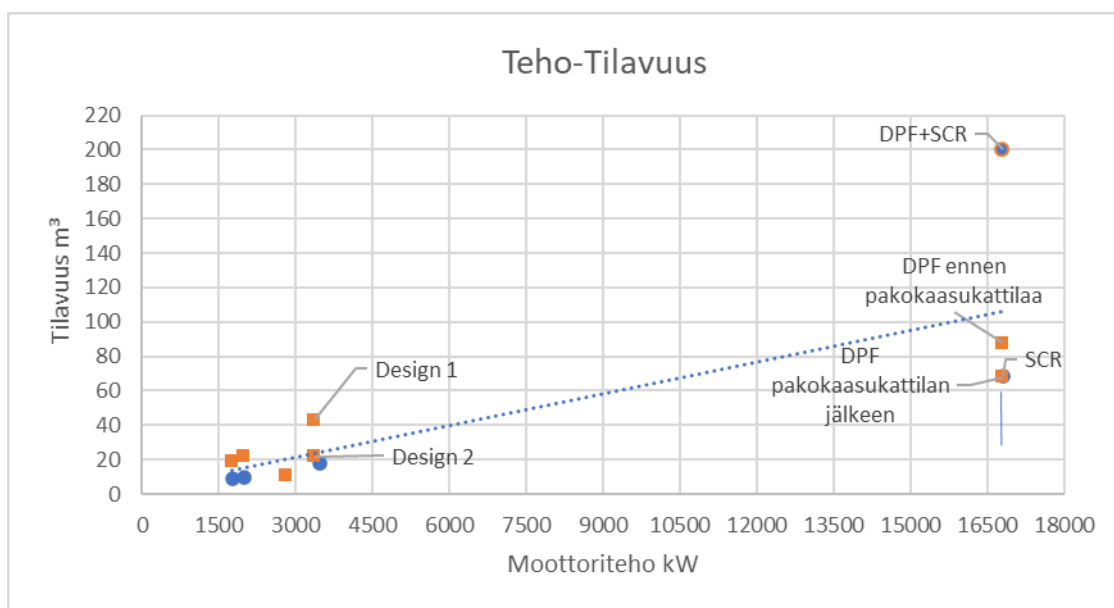
Suodatintekniikka	-
Regenerointi	-
Vastapaine	25 mbar puhtaana, max 35 mbar
Lämpötilavaatimus	350°C
Hiukkassuodatus (PM)	>99% määrällisesti (PN) >85% massana
CO	>90%
HC	>83%
Regenerointiaikaväli	-
Huolto ja suodattimien vaihto	~6000 h
Paino	3 700 kg
Tilavuus	10,64 m ³

Valmistaja 2 ei ole ilmoittanut DPF:n suodatustekniikkaa tai regenerointitapaa. Sillä ilmoitetaan myös korkea hiukkasten laskua lukumääränä, joista suurin osa on nanohiukkaina. Komponentin painoksi on ilmoitettu 3700 kg.

Valmistajan 2 SCR-komponentti koostuu reaktorista, jossa katalyytit ovat sijoitettuna kolmeen eri kerrokseen. Suoraa putkea tarvitaan yli 1700 mm urean ruiskutusta varten ja sen halkaisijaksi on ilmoitettu 700 mm. Koko SCR-järjestelmän vastapaineeksi on ilmoitettu 16,4 mbar.

6.1.3 Tilankäyttö ja vastapaine

Molempien valmistajien DPF- ja SCR-komponenttien tilavaatimukset ovat esitettyinä alla olevassa moottoriteho-tilavuus kuvaajassa (Kuva 27). Kuvaajasta havaitaan komponenttien tilatarpeen kasvavan moottoritehon kasvaessa. Kuvaajassa on myös esitettyä designmuutoksella saavutettava tilansäästö. Kuvaajasta voidaan havaita, että komponenttien tilavuus kasvaa moottoritehon kasvaessa.



Kuva 27. DPF:n (oranssi) ja SCR:n (sininen) tilavuus moottoritehon funktiona.

Äänenvaimentimen pois jättämiseksi pakokaasujärjestelmästä tarvitaan lisätietoa valmistajilta siitä, millä taajuusalueilla komponenttien tuottama äänenvaimennus vaikuttaa ja saavutetaanko niillä riittävä vaimennus. Molempien valmistajien tapauksessa moottoreiden ilmoitettu maksimivastapaineraja ylittyy. Kyseisen expedition-risteilijäprojektin kannalta käytettävissä oleva tila komponenteille konehuoneissa ja kuiluissa asettaa reunaehdot komponenttien kasvattamiselle. Valmistajan 2 mukaan vastapaineiden kompensointi on lähinnä kannattavaa DPF:n kokoa kasvattaessa. SCR-komponentin mitoitus ja sillä saavutettava vastapaineen kompensointi on rajallista, jotta sen toimintaperiaate ei häiriintyisi. Valmistajat eivät tarjoa muita ratkaisuja vastapaineiden kompensointiin.

Pakokaasutuulettimien vaatiman suuren tehon vuoksi niiden käyttöä vastapaineiden kompensointiin on vaikea arvioida.

Kolmas osapuoli tarjoaa valmistajien 1 ja 2 moottoreille DPF- ja SCR-komponentteja Euro VI-rajan saavuttamiseksi. Etuina ovat joustavat lähdöt komponenteista, jolloin pystytään toteuttamaan suoraviivaisempi pakoputkisto.

6.2 Layout

Risteilijän General Arrangement pohjalle piirrettiin pakokaasujärjestelmä AutoCad 2016 suunnitteluohjelmistolla. Molempien valmistajien komponenteilla piirrettiin konseptit, miltä pakokaasujärjestelmä voisi näyttää. Komponenttien piirtämisessä on otettu huomioon vain ulkomuodot, jotka antavat suuntaa niiden vaatimalle tilalle. Valmistajan 1 komponenteilla ei saatu kuvattua toimivaa järjestelmää ja sitä käytetään vain esittämään tilan ja komponenttien koon aiheuttamia ongelmia. Järjestelmiin on myös kuvattu eri valmistajilta saatujen tietojen avulla pakokaasukattilan ja äänenvaimentimen koko ja sijainti. Piirretyt layout-kuvat noudattavat yksinkertaisesti kuvassa 28 esitettyä järjestystä:

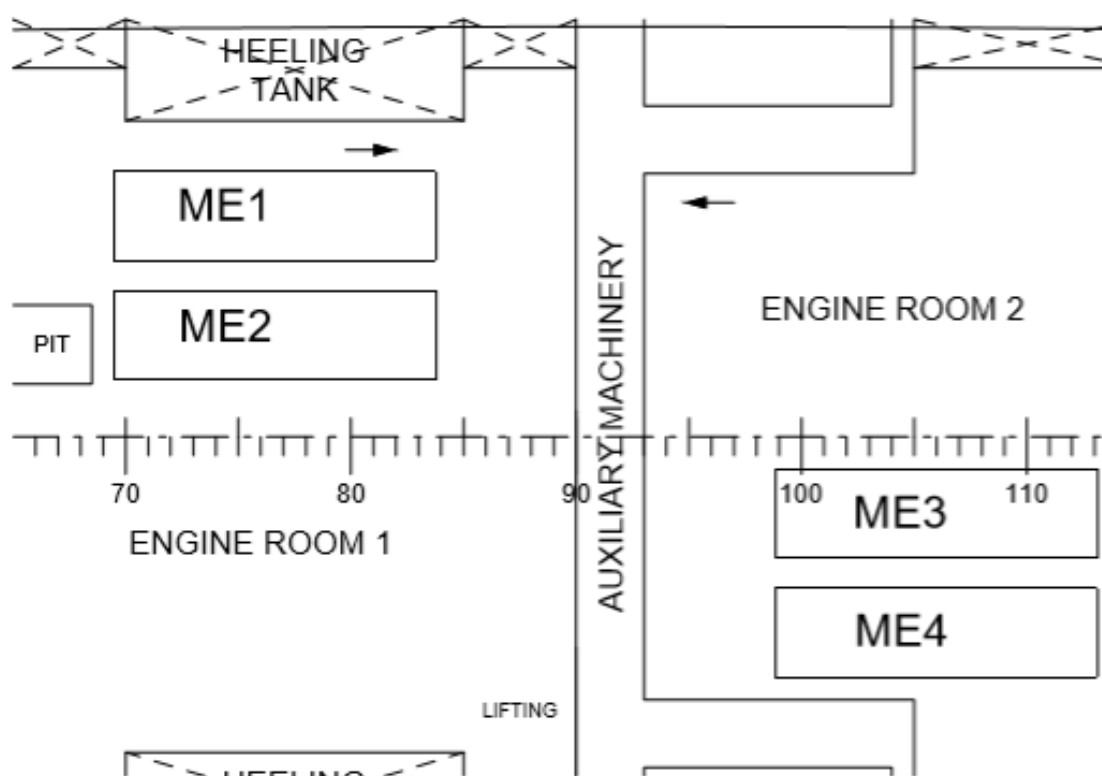


Kuva 28. Komponenttien järjestys pakokaasujärjestelmässä.

Layout-kuvassa on otettu huomioon vain pääkomponentit. Järjestelmän vaatimia apulaitteita ei ole piirretty.

6.2.1 Valmistajan 2 komponentit

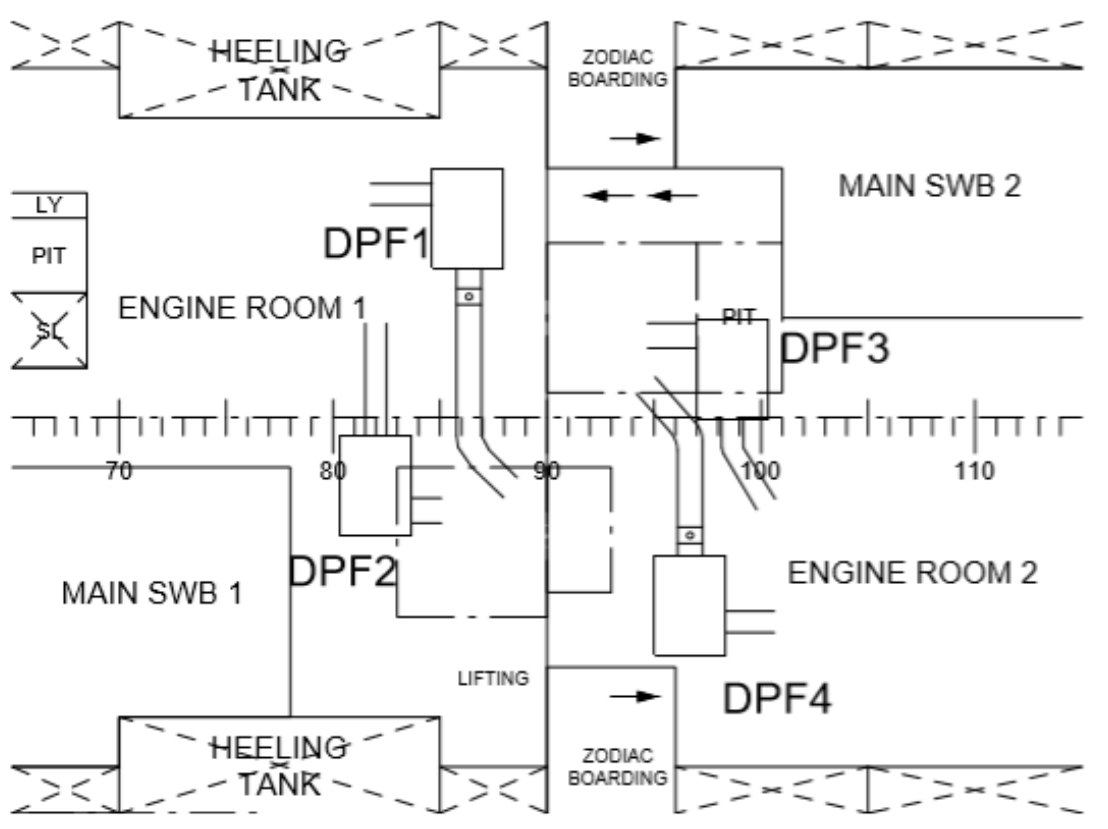
Kuvassa 29 on esitettyä dieselsähköisen koneiston (ME1-4) sijoittaminen konehuoneisiin 1. kannella. Kuvassa 30 näkyy 2. kannelta alkavat MAIN SWB 1-2 tilat, joiden alle konehuoneisiin ei voida sijoittaa moottoreita niiden suuren koon vuoksi.



Kuva 29. Dieselsähköisen koneiston sijainti konehuoneissa 1. kannella.

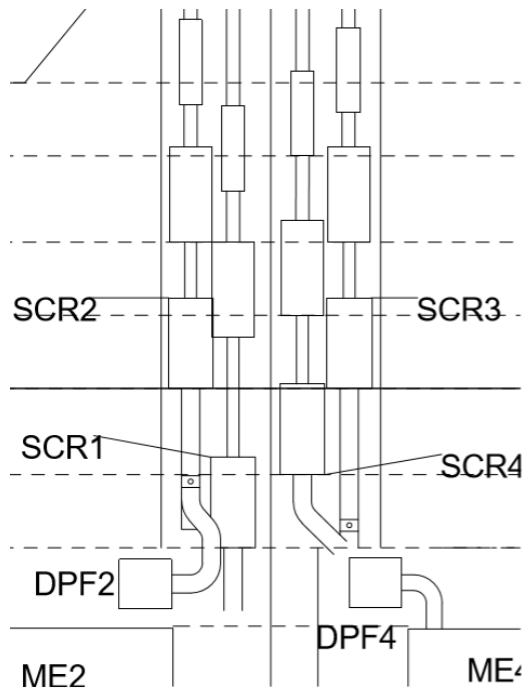
DPF-komponentit (DPF1-4) ovat sijoitettuna 2. kannelle (Kuva 30) mahdollisimman lähelle moottoria, jotta saavutetaan riittävä operointilämpötila. Kyseiset hiukkassuodattimet regeneroituvat 350°C lämpötilassa. Komponenttien sijoittamiseen vaikuttavat myös niiden paino sekä huollolle ja tuhkanpuhdistukselle vaadittava tila. Pakokaasuputken lähdöt ja tulot on sijoitettu siten, ettei pakokaasua tarvitse johtaa putkeen, vaan se saadaan suoraan komponentista haluttuun suuntaan. Näin säästytään turhilta 90° käänöksiltä pakoputkistossa, jotka lisäävät putkiston aiheuttamaa vastapainetta. DPF-komponenttien jälkeen pakokaasujärjestelmässä on SCR-reaktorit. SCR-reaktorit ovat sijoitettuna

DPF:n jälkeen, jotta ne pysyisivät puhtaana ja niiden toimintakyky pysyisi mahdollisimman tehokkaana.



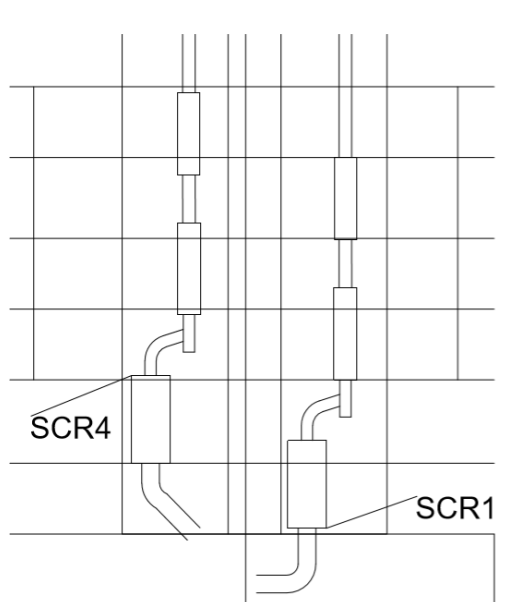
Kuva 30. DPF-komponentit sijoitettuna 2. kannelle.

Kuvassa 30 näkyy DPF 1 ja DPF 2 jälkeen tapahtuva urean ruiskutus. Putkea on riittävästi, yli 2 m, riittävän urean ja pakokaasun sekoittumisen saavuttamiseksi. Tämän vuoksi saadaan kuvassa 31 näkyvät SCR1 ja SCR4 sijoitettua mahdollisimman alas. Kuvassa näkyy kuiluun sijoitetut SCR-reaktorit, joiden jälkeen pakokaasujärjestelmässä on pakokaasukattila ja äänenvaimennin. Komponenttien sijoittaminen on porrastettu, jotta niiden huollolle jäisi riittävästi tilaa. Pakokaasukattilan jälkeen pakokaasun lämpötilan arvioidaan olevan noin 230°C. Tästä syystä se täytyy sijoittaa SCR jälkeen, jotta SCR saavuttaisi tarvittun lämpötilan operoinnille.



Kuva 31. SCR-reaktorit sijoitettuna kuiluun.

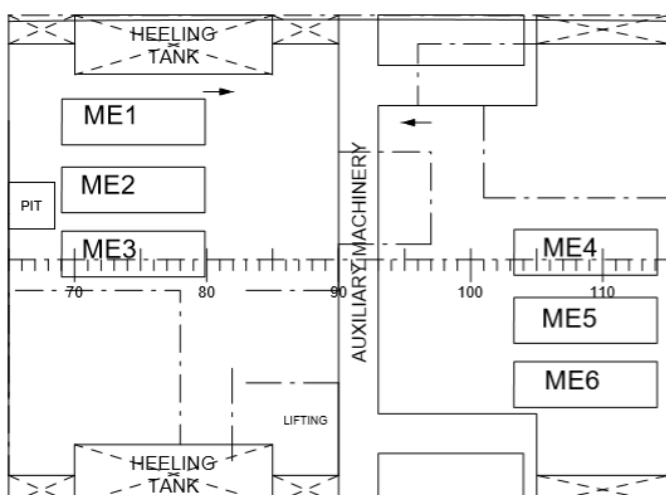
Kuvassa 32 on esitettyä poikkileikkaus risteilijästä. Siinä näkyy ennen pakokaasukattilaa oleva tasaaja vedenpoistolle, jotta pakokaasukattilasta tuleva vesi ei päädy katalysaattoriin.



Kuva 32. Poikkileikkaus risteilijästä

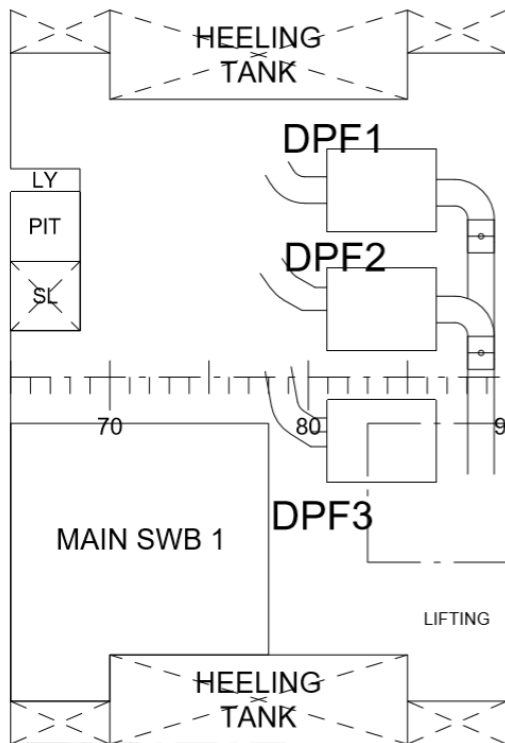
6.2.2 Valmistajan 1 komponentit

Valmistajan 1 kokonaisratkaisulla layout on huomattavasti vaikeampi toteuttaa. Tähän vaikuttaa yksinkertaisesti vähäinen käytössä oleva tila konehuoneissa ja kuilussa, moottorien ja komponenttien määrä ja niiden suuri koko. Komponentit esitetään vain konehuoneessa 1 ja siitä lähtevässä kuilussa. Kuvassa 33 on esitettyä konehuoneet 1 ja 2, joihin molempiin on sijoitettu kolme moottoria. Kuvaan on myös hahmotettuna suoraan heti 2. kannelta alkavat MAIN SWB1-2 tilat. Konehuone 2:n rajattu tila vaikeuttaa pakoputkien johtamista kuiluun.

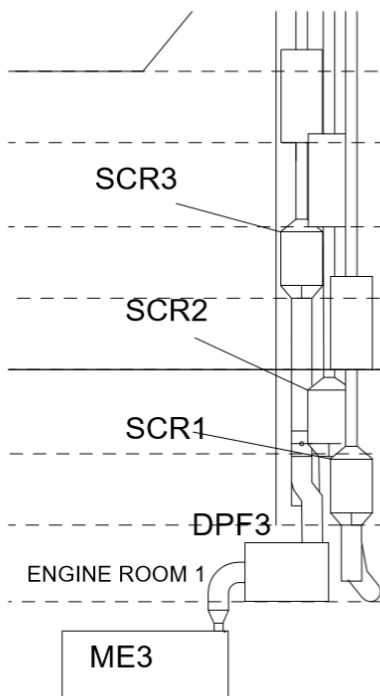


Kuva 33. Valmistajan 1 moottorit sijoitettuna 1. kannelle.

Kuvassa 34 on esitettyä DPF-komponentit 1 konehuoneessa sijoitettuna 2. kannelle. Komponenttien suuri koko ja niille varattu huoltotila, noin 1 m, eivät mahdollista joustavaa sijoittamista konehuoneeseen. Myös valmistajan ilmoittamien lähtöjen perusteella joudutaan toteuttamaan useampi 90° käyntö pakoputkistossa. DPF 1 ja 2 jälkeen on riittävästi suoraa putkea, jotta urean ruiskutus voidaan toteuttaa heti niiden jälkeen. Tästä syystä saadaan SCR 1 ja 2 sijoitettua alemmaksi kuiluun (Kuva 35). SCR3:n urean ruiskutus tapahtuu kuilussa. Tälle vaadittavan suoran putken pituuden takia muut komponentit joudutaan sijoittamaan korkeammalle kuiluun.



Kuva 34. DPF-komponentit 2. kannella.



Kuva 35. Komponentit sijoitettu porrastetusti kuiluun.

7 Johtopäätökset

Työn tarkoituksena oli tutkia, miten Euro VI -päästönormi voidaan saavuttaa expedition-risteilijällä ja millaisia vaikutuksia pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmällä olisi suunniteluun. Vaihtoehtoisten polttoaineiden päästöarvoja tarkastellessa todettiin, että polttoainetta vaihtamalla ei saavuteta haluttua päästönormia. Huomattava muutos päästöarvoissa havaittiin ainoastaan LNG:llä. Moottorivalmistajien tarjoamista kokonaisratkaisuista päästönormin saavuttamiseksi parhaimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui DPF + SCR -jälkikäsitteilyratkaisu. Myös kirjallisuustutkimuksen perusteella kyseisillä tekniikoilla voidaan saavuttaa NO_x- ja PM-päästöjen Euro VI -rajat, jos käytetään hyvin matalarikkistä polttoainetta.

Tutkimuksessa todettiin, että DPF:n sijoittaminen ennen SCR:ää on toimivin asetelma. Näin saadaan DPF regeneroitumaan tehokkaammin ja pidettyä SCR puhtaana, jotta sen toiminta ei heikkenisi. SCR- ja DPF-komponentit kuitenkin nostavat huomattavasti pakokaasujärjestelmän tuottamaa kokonaisvastapainetta, mikä voi aiheuttaa ongelmia moottorin toiminnalle ja nostaa polttoaineen kulutusta. Tässä tutkimuksessa molempien moottorivalmistajien ilmoittamat maksimivastapainerajat ylittyivät DPF- ja SCR-komponentteja hyödyntäessä. Moottorin muokkaaminen operoimaan korkeammalla pakokaasujärjestelmän tuottamalla vastapaineella on vaikeaa ja kallista. Valmistajien esittämällä komponenttien koon kasvattamisella saavutettava vähennys vastapaineissa oli hyvin vähäistä ja vähäisen käytettävissä olevan tilan vuoksi vaikeaa. Komponenteilla saavutettavasta äänenvaimennuksesta ei saatu tarpeeksi tietoa, jotta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä siitä, voidaanko äänenvaimennin jättää pois järjestelmästä.

Tutkimuksessa ei arvioitu eri ratkaisujen kustannuksia, jotka varmasti vaikuttavat siihen, kuinka Euro VI -tavoitetta lähdetään toteuttamaan. Jatkotutkimuksena suositellaan eri ratkaisujen kustannusvertailua. Jatkotutkimuksena voitaisiin myös selvittää, kuinka pakokaasutuuletinta voidaan hyödyntää kompensoimaan korkeaa vastapainetta ja miten turboahtimen uudelleen sovitus vaikuttaa polttoaineen kulutukseen tarkastellussa projektissa. Äänenvaimennuksen osalta tulee selvittää, millaisella taajuusalueella DPF- ja

SCR-komponenttien tuottama vaimennus tapahtuu ja kuinka äänenvaimentaminen yhdistäminen kyseisten komponenttien kotelointiin onnistuu. Myös kolmannen osapuolen moottoreille tarjoamien jälkikäsitteilyratkaisujen tilantarpeet tulisi arvioida ja selvittää, miten ne vaikuttavat kokonaisvastapaineeseen ja siten polttoaineen kulutukseen.

8 Yhteenveto

Dieselmoottorin haitalliset päästöt koostuvat pääosin PM-, NO_x-, HC-, CO- ja SO_x-päästöistä. Haitallisista päästöistä NO_x ja PM ovat myrkyllisimpiä ja niitä rajoitetaan maailmanlaajuisesti. Arktinen alue on erityisen herkkä meriliikenteestä peräisin olevalle mustalle hiilelle, jolla on jäätiköistä sulattava vaikutus.

Tässä työssä tutkittiin Euro VI päästönormin vapaaehtoista soveltamista arktisilla alueilla liikkuvaan expedition-risteilijään. Alustaviksi ongelmiksi tiedettiin vähäinen käytettävissä oleva tila konehuoneissa ja kuiluissa pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmille sekä jälkikäsittelyjärjestelmien tuottama korkea vastapaine.

Työn teoriaosuudessa kuvattiin aluksi dieselmoottorin päästöt ja niiden syntyminen. Tämän jälkeen esitettiin merenkulun nykyiset päästörajoitukset ja sovellettava Euro VI -päästönormi. Kirjallisuuskatsauksen perusteella selvitettiin vaihtoehtoisilla polttoaineilla saavutettavat päästötasot ja verrattiin niitä tavoitepäästötasoon. ULSFO:n, HVO:n ja LNG:n päästöarvoja tarkastellessa todettiin, että polttoainetta vaihtamalla ei saavuteta haluttua Euro VI -päästönormia. Teoriaosuuden viimeisessä osiossa tutkittiin pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmiä ja arvioitiin niiden soveltumista merenkulkuun. Erityisesti tarkasteltiin vastapaineen vaikutuksia suunnitteluun, polttoaineen kulutukseen ja päästöihin. Tekniikoita pakokaasujen jälkikäsittelykomponenttien aiheuttaman vastapaineen kompensointiin kerättiin kirjallisuudesta ja haastattelulla.

Työn empiirisessä osassa tutkittiin eri valmistajilta saatuja ratkaisuja päästönormin saavuttamiseksi. Moottorivalmistajien tarjoamista kokonaisratkaisuista päästönormin saavuttamiseksi parhaimmaksi vaihtoehdoksi osoittautui DPF + SCR -jälkikäsittelyratkaisu. Myös kirjallisuustutkimuksen perusteella kyseisillä tekniikoilla voidaan saavuttaa NO_x- ja PM-päästöjen Euro VI -rajat, jos käytetään hyvin matalarikkistä polttoainetta.

Jälkikäsittelyjärjestelmän suunnittelussa ja komponenttien sijoittelussa tärkeitä seikkoja olivat pakokaasun lämpötila, komponenttien vaatima lämpötila sekä moottorin sallittu

maksimivastapaine. Komponenttien sijoittamiseen vaikuttivat myös niiden paino sekä huollolle ja tuhkanpuhdistukselle vaadittava tila. Tutkimuksessa todettiin, että DPF:n sijoittaminen ennen SCR:ää on toimivin asetelma. Näin saadaan DPF regeneroitumaan tehokkaammin ja pidettyä SCR puhtaana, jotta sen toiminta ei heikkenisi. Tutkimuksen tuloksena piirrettiin lopuksi pakokaasujärjestelmän layout-kuvat.

Layout-kuvan piirtäminen valmistajan 1 komponenteilla osoittautui vaativaksi komponenttien suuren koon ja vähäisen käytettävissä olevan tilan takia. Tämä vaikeuttaa suoraviivaisen pakoputkiston suunnittelua, jotta siitä ei aiheutuisi lisää vastapainetta komponenttien jo valmiiksi tuottaman suuren vastapaineen lisäksi. Valmistajan 2 DPF-komponentit ovat pienemmät ja niitä tarvitaan määrällisesti vähemmän, joka helpottaa suunnittelua ja pakoputkien johtamista SCR-reaktoreille.

Vastapaineen kompensointi osoittautui haasteelliseksi ja kalliiksi. Komponenteilla saavutettavasta äänenvaimennuksesta ei saatu tarpeeksi tietoa, jotta voitaisiin tehdä johtopäätöksiä siitä, voidaanko äänenvaimennin jättää pois järjestelmästä. Tutkimusta tehdessä löytyi myös useampi jatkokehitysaiehe:

- Jälkikäsitteilyjärjestelmien kustannusvertailu
- Pakokaasutuulettimen ja turbon uudelleen sovituksen hyödyntäminen kompensoimaan korkeita vastapaineita
- DPF- ja SCR-järjestelmillä saavutettava äänenvaimennus ja niiden yhdistäminen äänenvaimentimiin
- Tarkasteltujen moottorivaihtoehtojen yhdistäminen kolmannen osapuolen tarjomiin jälkikäsitteilyratkaisuihin.

Lähteet

- Aakko-Saksa, P. (2018). *Control measures of black carbon emissions from marine diesel engines - focus on results obtained using measurement methods selected by the IMO*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Research Report, No. VTT-R-06900-18. <https://cris.vtt.fi/en/publications/control-measures-of-black-carbon-emissions-from-marine-diesel-eng>
- Aatola, H., Larmi, M., Sarjovaara, T. & Mikkonen, S. (2008). Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NO_x, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine. *SAE Int. J. Engines*, 1(1), 1251–1262. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2500>
- Achillas, S., Fusstetter, K., Mutter, A. & Christen, C. (2019). Turbocharging Technology as an Enabler in the Path Towards Zero Emissions for the Two-Stroke Marine Propulsion Segment. CIMAC Congress, Vancouver, Paper No.:381
- Anderson, M., Salo, K. & Fridell, E. (2015). Particle- and Gaseous Emissions from an LNG Powered Ship. *Environmental science & technology*, 49(20), p. 12568. doi:10.1021/acs.est.5b02678
- Azam, A., Ali, S. & Iqbal, A. (2016). Emissions from Diesel Engine and Exhaust After Treatment Technologies. 4th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, Jamshoro, 134. https://www.researchgate.net/publication/314215052_Emissions_from_Diesel_Engine_and_Exhaust_After_Treatment_Technologies
- Buchholz, B., Püschel, M., Dreves, J., Rabe, R. & Peppel, T. (2016). Detailed analysis of PM emissions from a medium speed diesel engine as a precondition for successful application of DPF. CIMAC Congress, Helsinki, Paper No.: 221

- Cattaneo, F. (2018). Selective Catalytic Reduction for Marine Applications. Noudettu 2020-06-02 osoitteesta <http://resolver.tudelft.nl/uuid:d826e500-4551-4a8e-bd80-fefea35a8c10>
- Christianen, K., Loulidi, Y., Peitz, D., Mattheeuws, L. & Berckmoes, T. (2019). Integration and Matching of Diesel Particulate Filters for ABC Medium-Speed Engines. CIMAC Congress, Vancouver, Paper n.: 361
- CIMAC. (2014). CIMAC Guideline. Future Fuel Scenarios and their impact on Lubrication https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG8/CIMAC_WG08_2014_05_Guideline_Fuel_Scenarios_Impact_Lubrication.pdf
- CIMAC. (2015). CIMAC Position Paper. New 0.10% sulphur marine (ECA) fuels. https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG7/CIMAC_WG07_2015_Jun_Position_sulphur_marine_ECA_fuels.pdf
- Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B. & Ruhterford, D. (2017). Prevalence of heavy fuel oil and black carbon in Arctic shipping, 2015 to 2025. The International Council on Clean Transportaiton. https://theicct.org/sites/default/files/publications/HFO-Arctic_ICCT_Report_01052017_vF.pdf
- Corbin, J., Peng W., Yang, J., Sommer, D., Trivanovic U., Kirchen P., Miller W., Rogak, S., Cocker, D., Smallwood, G., Lobo, P. & Gagné, S. (2020). Characterization of particulate matter emitted by a marine engine operated with liquefied natural gas and diesel fuels. *Atmospheric Environment*, 220117030. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117030>
- DieselNet. (2019). Emission Standards. EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines. Noudettu 2020-03-02 osoitteesta <https://dieselnet.com/standards/eu/hd.php>

DieselNet. (2020). IMO Marine Engine Regulations. Noudettu 2020-02-25 osoitteesta <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

DieselNet. (2002). Fuel Properties and Emissions. Noudettu 2020-04-02 osoitteesta https://dieselnet.com/tech/fuel_emi.php

Elgohary, M. M., Seddiek, I. S. & Salem, A. M. (2014). Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of engineering for the maritime environment*, 229(4), 365–375. doi:10.1177/1475090214522778

Exhaust Gas Cleaning System Association. (2012). EGCSA Handbook. *A practical guide to exhaust gas cleaning systems for the maritime industry*. Noudettu 2020-06-05 osoitteesta <https://www.egcsa.com/wp-content/uploads/EGCSA-Handbook-2012-A5-size-.pdf>

Fernández, I. A., Gómez, M. R., Gómez, J. R. & Insua, Á. B. (2017). Review of propulsion systems on LNG carriers. *Renewable & sustainable energy reviews*, 67, 1395–1411. doi:10.1016/j.rser.2016.09.095

Geller, M. (2016). Diesel Particulate Filters for PM Control from Marine Engines. 3rd ICCT Workshop on Marine Black Carbon emissions: Measuring and controlling BC from marine engines, Vancouver.

Günther, H. (2018). Pakokaasujen jälkikäsittely dieselmootoreissa: Hiukkassuodattimet, (SCR-)katalysaattorit, järjestelmättestaus (1. painos.). [Helsinki]: Autoalan koulutuskeskus.

- Heck, R., Farrauto, R. & Gulati, S. (2016). *Catalytic Air Pollution Control : Commercial Technology*, John Wiley & Sons, Incorporated. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=875946>.
- Hissa, M. (2014). Työkonedieselmoottorin suoritusarvo- ja päästötuloksia uusiutuvin ja perinteisin polttoainein. [diplomityö, Vaasan Yliopisto]. Osuva. Noudettu 2020-04-02 osoitteesta <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/631>
- IACCSEA. (2019). NOx Emission Control Areas. Noudettu 2020-03-07 osoitteesta <https://www.iaccsea.com/nox/imo-nox-regulation>
- IMO. (2015). INVESTIGATION OF APPROPRIATE CONTROL MEASURES (ABATEMENT TECHNOLOGIES) TO REDUCE BLACK CARBON EMISSIONS FROM INTERNATIONAL SHIPPING. International Maritime Organization. <https://www.imo.org/en/Our-Work/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Black%20Carbon.pdf>
- IMO. (2016). STUDIES ON THE FEASIBILITY AND USE OF LNG AS A FUEL FOR SHIPPING.PDF. International Maritime Organization. <https://iwlearn.net/documents/32778IMO>.
- IMO. (2019). GHG emissions from international shipping. International Maritime Organization. Noudettu 2020-06-15 osoitteesta <https://www.imo.org/en/Our-Work/Environment/Pages/GHG-Emissions.aspx>
- IMO. (2020a). Shipping in polar waters. International Maritime Organization. Noudettu 2020-08-02 osoitteesta <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/polar-default.aspx>

- (2020b). Air Pollution, Energy Efficiency and Greenhouse Gas Emissions. International Maritime Organization. Noudettu 2020-03-05 <https://www.imo.org/en/Our-Work/Environment/Pages/AirPollution-Default.aspx>
- Izumi, Y., Ohara, H., Kamata, H., Nakajima, H., Yamada, T., Irie, M., Moriyama, K. & Goto, K. (2013). Urea-SCR system for pollution control in marine diesel engines. CIMAC Congress, Shanghai, Paper No.: 172.
- Joardder, Mohammad Uzzal Hossain, Uddin, Md. Shazib & Roy, Murari Mohon (2011). Effect of engine backpressure on the performance and emissions of a CI engine. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering 2011 (ICME2011)*, 18-20 December 2011, BUET, Dhaka, Bangladesh. https://www.researchgate.net/publication/252629767_Effect_of_engine_backpressure_on_the_performance_and_emissions_of_a_CI_engine
- Johansen, K. (2015). Multi-catalytic soot filtration in automotive and marine applications. *Catalysis Today*, 258, 2–10. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.06.001>
- Jääskeläinen, H. (2007). Engine Exhaust Back Pressure. Noudettu 2020-04-22 osoitteesta https://dieselnet.com/tech/diesel_exh_pres.php
- Jääskeläinen, H. & Khair, M. (2017). Effect of EGR on Emissions and Engine Performance. Noudettu 2020-05-20 https://dieselnet.com/tech/engine_egr_emissions.php
- Knafl, A., Gunnar, S. & Friebe, M. (2013). Optimal Utilization of Air- and Fuel-Path Flexibility in Medium-Speed Diesel Engines to Achieve Superior Performance and Fuel Efficiency. CIMAC Congress, Shanghai, Paper NO.: 91
- Kock, F. (2019). NOx Tier III Update: Choices and Challenges for Compliance. CIMAC Congress, Vancouver, Paper n.: 53

- Kristensen, H. (2012). Energy demand and exhaust gas emissions of marine engines. *Clean Shipping Currents*, 1(6), 18–26.
- Lao, C.T., Akroyd, J., Eaves, N., Smith, A., Morgan, N., Nurkowski, D., Bhave, A. & Kraft M. (2020). Investigation of the impact of the configuration of exhaust after-treatment system for diesel engines. *Applied Energy*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114844>.
- Lauer, P. (2012). On the experience of first DPF operation a medium speed 4-stroke Diesel engine on board a commercial ocean going vessel. 16th ETH Conference on Combustion Generated Particles, Zürich.
- Lloyd's Register. (2012). Understanding exhaust gas treatment systems. Guidance for shipowners and operators. Noudettu 2020-06-25 https://www.alfalaval.sk/globalassets/documents/microsites/puresox/understanding_exhaust_gas_treatment_systems.pdf
- Majewski, A. & Jääskeläinen, H. (2019). Exhaust Particulate Matter. Noudettu 2020-04-05 osoitteesta <https://dieselnet.com/tech/dpm.php>
- Majewski, W. A. & Khair, M. K. (2006). Diesel emissions and their control. Warrendale, PA: SAE International.
- Merkisz, J. & Pielecha, J. (2015). *Nanoparticle Emissions From Combustion Engines*. Springer.
- Mikkonen, S. (2008). Second-generation renewable diesel offers advantages. *Hydrocarbon Processing*, 87(2), 63–66.

- Neste. (2016). Neste Renewable Diesel Handbook. https://www.staroilco.net/wp-content/uploads/2016/03/neste_renewable_diesel_handbook.pdf
- Nonokawa, M., Katsuki, T. & Noshiro, S. (2016). Ceramic Filter for Ship Diesel Engines - PM (black carbon) removal technology using CERALLEC® system (Ver. 2*). Nou-dettu 2020-04-22 osoitteesta <https://www.ngk-insulators.com/en/product/industrial/dustcollector/ship/index.html>
- Oksanen, S., Gao, Z., Saine, K., Holmberg, Jan. & Hartikainen, J. (2016). Optimized performance, design and manufacturing of compact silencer system for engine exhaust noise. CIMAC Congress, Helsinki. Paper No.: 187
- Okubo, M. & Kuwahara, T. (2019). New Technologies for Emission Control in Marine Diesel Engines. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-03397-1>
- Ovaska, T., Niemi, S., Sirviö, K., Nilsson, O., Portin, K. & Asplund, T. (2019). Effects of alternative marine diesel fuels on the exhaust particle size distributions of an off-road diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 150, 1168–1176. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.090>
- Pundir, B. (2017). Engine Emissions: Fundamentals and Advances in Control. Alpha Science International Ltd.
- Ristimäki, J., Hellen, G. & Lappi, M. (2010). Chemical and physical characterization of exhaust particulate matter from a marine medium speed diesel engine. CIMAC Congress, Bergen 2010. Paper No.: 73

- Sappok, A., & Wong, V. (2010). Ash Effects on Diesel Particulate Filter Pressure Drop Sensitivity to Soot and Implications for Regeneration Frequency and DPF Control. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(1), 380–396. Noudettu 2020-05-05, osoitteesta: www.jstor.org/stable/26272664
- Sappok, A. (2013). Ash Accumulation in Diesel Particulate Filters. Noudettu 2020-05-04 osoitteesta https://dieselnet.com/tech/dpf_ash.php
- Schweighofer, J. & Blaauw, H. (2009). FINAL REPORT THE CLEANEST SHIP PROJECT. <https://www.researchgate.net/publication/273447753>.
Doi:10.13140/2.1.4202.8326
- Suomen Varustamot. (2018) Ilmastonsuojelu ja ilmastonmuutos. Noudettu 2020-03-20 osoitteesta <https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/ilmastosuojelu-ja-ilmastonmuutos>
- Takahashi, C. & Masuda, A. (2018). New Research on Black Carbon control. 5th ICCT Workshop on Marine Black Carbon emissions, San Francisco.
- The International Council on Clean Transportation. (2016). A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards. Noudettu 2020-03-10 osoitteesta https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf
- Tinschmann, G., Thum, D., Schlueter, S., Pelemis, P. & Stiesch, G. (2010). Sailing towards IMO Tier III - Exhaust aftertreatment versus engine-internal technologies for medium speed diesel engines. CIMAC Congress, Bergen, PAPER NO.: 274.

- Tyrovola, T., Dodos, G., Kalligeros, S. & Zannikos, F. (2017). The Introduction of Biofuels in Marine Sector. *Journal of Environmental Science and Engineering A*, 6(8). doi:10.17265/2162-5298/2017.08.006
- Ushakov, S. & Lefebvre, N. (2019). Assessment of Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) Applicability as an Alternative Marine Fuel Based on Its Performance and Emissions Characteristics. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 12(2). <https://doi.org/10.4271/04-12-02-0007>
- Ushakov, S., Stenersen, D. & Einang, P.M. (2019) Methane slip from gas fuelled ships: a comprehensive summary based on measurement data. *Journal of Marine Science and Technology*, 24(4), 1308–1325. <https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1007/s00773-018-00622-z>
- Wik, C. & Niemi, S. (2016). Low emission engine technologies for future tier 3 legislations - options and case studies. *Journal of Shipping and Trade*, 1(1), 1–22. doi:10.1186/s41072-016-0009-z
- Zetterdahl, M., Moldanová, J., Pei, X., Pathak, R. K. & Demirdjian, B. (2016). Impact of the 0.1% fuel sulfur content limit in SECA on particle and gaseous emissions from marine vessels. *Atmospheric Environment*, 145, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.022>

Liitteet

Liite 1. HFO- ja RMB 30 -polttoaineiden ominaisuudet

<i>Compound/property</i>	<i>HFO</i>	<i>RMB30</i>
<i>Carbon (%m/m)</i>	88.4	87.4
<i>Hydrogen (%m/m)</i>	10.9	12.8
<i>Nitrogen (mg/kg)</i>	5200	440
<i>Sulfur (%m/m)</i>	0.48	0.092
<i>Oxygen, calc (%m/m)</i>	<0.0	<0.3
<i>Vanadium (mg/kg)</i>	5	1
<i>Nickel (mg/kg)</i>	33	2
<i>Iron (mg/kg)</i>	1	2
<i>Calcium (mg/kg)</i>	12	1
<i>Zinc (mg/kg)</i>	1	<1
<i>Ash (%m/m)</i>	0.006	0.004
<i>Carbon residue (%m/m)</i>	12.82	0.68
<i>Aromatics, total (%vol)</i>	26.7	19.6
<i>Mono-/di-/polyaromatics (%vol)</i>	7.7/2.1/16.95	11.7/5.5/2.73
<i>Density at 15 °C (kg/m³)</i>	982.5	892.8
<i>Viscosity at 50 °C (cst)</i>	355	12.05
<i>Calorific value net (MJ/kg)</i>	40.42	41.60