



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Samuli Eloranta

Laivaliikenteen päästöjen kehitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

29.12.2020

Tekijä(t) Otsikko	Samuli Eloranta Laivaliikenteen päästöjen kehitys
Sivumäärä Aika	29 sivua 29.12.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaaja(t)	Lehtori Heikki Parviainen
<p>Tässä työssä tarkastellaan laivaliikenteen päästöjen koostumista sekä niiden tulevaisuuden trendejä. Pyritään selvittämään, mitä keinoja hyödyntämällä voidaan vähentää laivaliikenteen päästöjä ja parantaa energiatehokkuutta. Ratkaisut jaetaan vaiheisiin niiden todennäköisen ajankohdan mukaan.</p> <p>Insinööryössä tarkastellaan globaalin merenkulkusektorin koostumusta laiva- sekä polttoainetyypeittäin. Pintapuolisesti perehdytään laivojen moottoritekniikkaan ja lyhyesti kuvataan, miten nykyiseen kehityssuuntaan on päädytty. Lisäksi työssä tarkastellaan maailmanlaajuisesti kiristyvää päästöjä vähennyslainsäädäntöä ja säästöjen toimintavaiheita. Päästöjen vähentämisessä keskitytään pääosin rahtilaivoihin, sillä ne muodostavat suuren osan laivaliikenteen aiheuttamista päästöistä. Vaihtoehtoisia polttoaineita verrataan keskenään ja esitellään potentiaalisia vaihtoehtoja. Energiatehokkuutta tarkastellaan laivan rakenteiden, moottoritekniikan ja muiden innovaatioiden osalta.</p> <p>Työssä onnistuttiin kartoittamaan toimivia keinoja parantaa laivojen energiatehokkuutta sekä esittelemään vaihtoehtoja kestävämmän liikennöinnin puolesta. Johtopäätökset jaettiin lyhyen sekä pitkän aikavälin ratkaisuihin.</p>	
Avainsanat	Merenkulku, laivatekniikka, energiatehokkuus

Author(s) Title	Samuli Eloranta Development of Shipping Emissions
Number of Pages Date	29 pages 29 December .2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Lecturer Heikki Parviainen
<p>This Bachelor's thesis examines the composition of emissions from shipping and their future trends. The aim was to find out what means can be used to reduce emissions from shipping and improve energy efficiency. Solutions are divided into different phases according to their apparent time.</p> <p>This thesis examines the composition of the global maritime sector by ship and fuel type. First marine engine technology is introduced in general, and after that how the current trend has been reached is described. In addition, the thesis examines the tightening of worldwide emission reduction legislation and the different stages of its operation. The focus on reducing emissions will mainly be on cargo ships, due to their large proportion of emissions from shipping. Different alternative fuels are compared with each other and potential options are presented. Energy efficiency is examined in terms of ship structures, engine technology and other innovations.</p> <p>The thesis succeeded in identifying effective ways to improve the energy efficiency of ships and in presenting alternatives for more sustainable maritime transport. The conclusions were divided into short-term and long-term options.</p>	
Keywords	Maritime, Ship Technology, Energy Efficiency

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Merenkulun voimanlähteet	3
3	Merenkulun päästöt	5
3.1	Hiilidioksidipäästöt	5
3.2	Merenkulun polttoaineet	6
3.3	Rikin ja typen oksidit sekä pienhiukkaspäästöt	7
3.4	Liikennemuotojen hiilitehokkuus	10
4	Kansainvälinen lainsäädäntö ja yleiset päästötavoitteet	11
5	Vaihtoehtoiset polttoaineet	14
5.1	Nesteytetty maakaasu	14
5.2	Uusiutuvat vaihtoehdot	15
5.3	Pitkän aikavälin vaihtoehdot	15
6	Energiatehokkuus	17
6.1	Rungon rakenteet sekä propulsiolaitteet	18
6.2	Energiansäästölaitteet	21
6.3	Moottoritekniset ratkaisut	26
6.4	Matkanopeuden hidastaminen	26
7	Johtopäätökset	28
	Lähteet	30

Lyhenteet

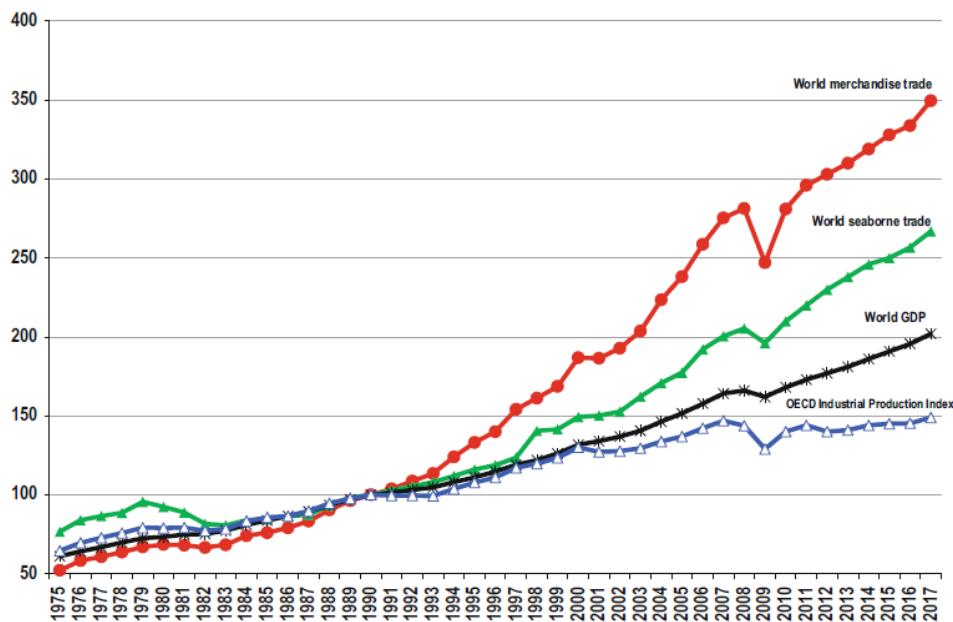
CRP	Contra rotating propeller – Vastasuuntiin pyörivät potkurit
DWT	Deadweight tonnage – Kuollut paino, aluksen kantavuus
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EGR	Exhaust Gas Recirculation – Pakokaasujen takaisinkierätyks
FPP	Fixed pitch propeller – Kiinteälapainen potkuri
GHG	Greenhouse Gases – Kasvihuonekaasut
HFO	Heavy fuel oil – Raskas polttoöljy
IMO	International Maritime Organization – Kansainvälinen merenkulkuorganisaatio
KHK	Kasvihuonekaasut
LNG	Liquefied Natural Gas - Nesteytetty maakaasu
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MDO	Marine Diesel Oil – Meridieselöljy
MEPC	Marine Environment Protection Committee - Meriympäristönsuojelukomitea
MGO	Marine Gasoil - Kaasuöljy
RPM	Rounds per minute – Kierrosta minuutissa
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektiivinen Katalyyttinen Pelkistäminen

Yhdisteet

CO ₂	Hiididioksidi
CO ₄	Metaani
CO ₃ OH	Metanoli
NO _x	Typen oksidit
SO _x	Rikin oksidit

1 Johdanto

Laivaliikenne on kooltaan yksi merkittävimmistä liikennesektoreista. Merenkululla on pitkät perinteet rahdin sekä matkustajien liikennöimisessä. Lentoliikenteen kasvun seurauksena matkustajamäärät ovat pienentyneet reittiliikenteessä ja keskittyneet lautta- ja risteilytoimintaan. Kaupallinen merenkulku on maailmanlaajuisesti välttämätön rahdin sekä energian kuljetusmuoto. Neljä viidesosaa maailman rahdista liikkuu meriteitse. Rahtimäärien ennustetaan kasvavan tulevaisuudessa voimakkaasti yleisen vaurastumisen sekä väestönkasvun seurauksena (kuva 1). Maailman talouskasvun indeksin vaihtelu mukailee hyvin vahvasti rahtiliikenteen määrää. Vuotuisen kasvun määrä on rahtiliikenteessä historiallisesti kolme prosentin luokkaa. Esimerkiksi merirahdin määrä kuluvalle vuosituhannella, vuosina 2000–2018 kasvoi 84 prosenttia rahtitonneina mitattuna. (2, s. 4–5.) Merenkulku aiheuttaa arviolta 3 prosenttia kaikista ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. (1, s. 8–9).



Kuva 1. Talouskasvun sekä bruttokansantuotteen suhde laivaliikenteen määrään (3, s. 7).

Raskas polttoöljy (Heavy Fuel Oil, HFO) on vakiintunut merenkulun pääasiallisena polttoaineena. Sen polttaminen tuottaa mittavien hiilidioksidipäästöjen lisäksi haitallisia pienhiukkaspäästöjä sekä erinäisiä rikin ja typen oksideja. Päästöjen vähentämiseksi on

tehty useita säädöksiä, joiden vaatimukset tulevat tiukentumaan tulevaisuudessa. Kansainvälinen merenkulku organisaatio (International Maritime Organization, IMO) on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita merenkulun päästöjen pienentämiseksi. Moottoritekni-
nen kehitys sekä tarjolla olevat vaihtoehtoiset polttoaineet eivät riitä yksinään saavutta-
maan päästötavoitteita pitkällä aikavälillä. Energiatohokkuuden noustessa yhä tärkeäm-
pään rooliin alusten päästöjen kannalta on tarkkailtava mahdollisia uusia innovaatioita
sekä energiaratkaisuja, joita pystyttäisiin laajamittaisesti hyödyntämään laivaliiken-
teessä.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan laivaliikenteen päästöjen koostumista ja niiden leik-
kauksiin kohdistettua kansainvälistä lainsäädäntöä. Merenkulussa suositut polttoaineet
esitellään ominaisuuksiltaan. Energiatohokkuutta parantavia ratkaisuja tarkastellaan
monella osa-alueella sekä kuvataan laivojen tekniikkaa pintapuolisesti. Työssä esitetään
parhaita nykyteknologialla mahdollisia ratkaisuja tulevien päästörajoitusten piiriin pääse-
misellä. Työssä luodaan katsaus potentiaalisiin ratkaisuihin vaihtoehtoisten polttoainei-
den saralla. Tavoitteena on tunnistaa keinoja hiili- sekä energiatohokkaamman liiken-
nöinnin saavuttamiseksi.

2 Merenkulun voimanlähteet

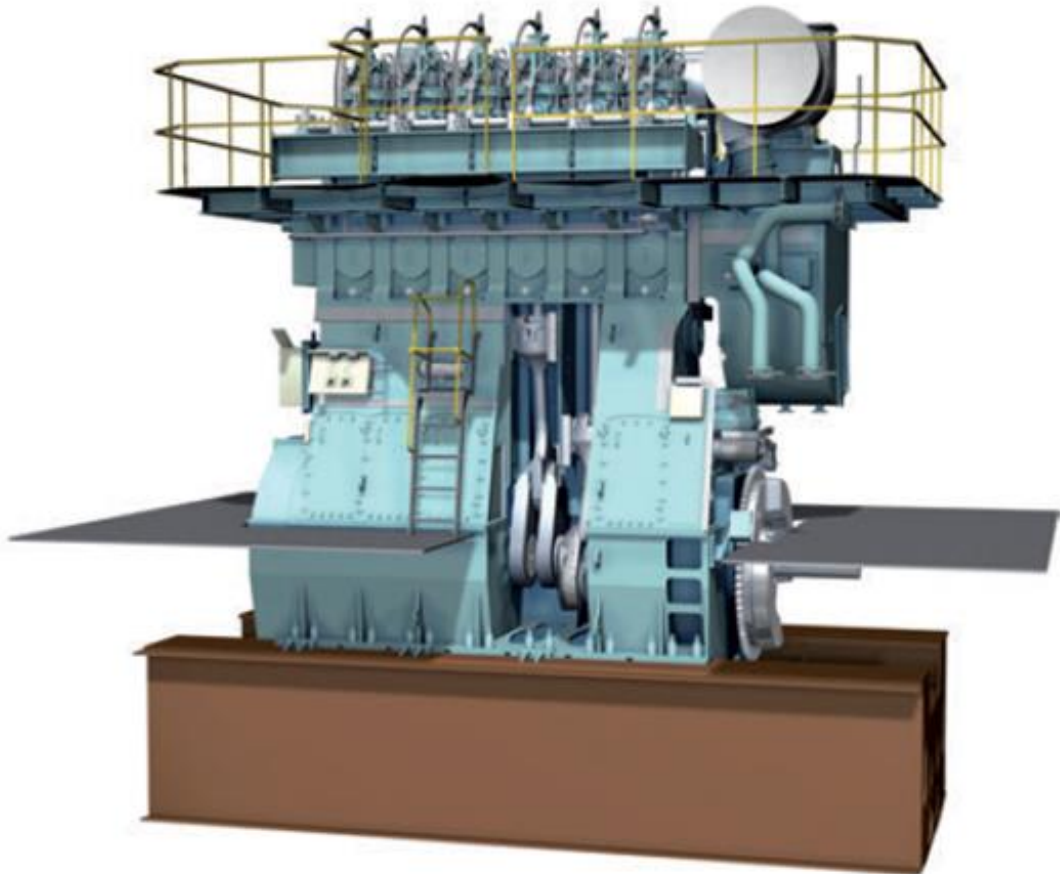
Laivaliikenne on muuttunut, muiden liikennemuotojen ohella, viimeisen sadan vuoden aikana huimasti. Teräksen noustessa päämääräiseksi rakennusmateriaaliksi valtamateriaaluksista kehittyi virtaviivaisempia ja kantavuudeltaan suurempia. 1800-luvun loppupuolella pystyivät nopeimmat alukset ylittämään 20 solmun nopeuden suotuisissa olosuhteissa, mikä lyhensi matka-aikaa huomattavasti. 1900-luvun alkupuolella dieselmootorit yleistyivät korvaten aiemmin käytetyt höyrykoneet suuremman hyötysuhteensa ansiosta. Juuri ennen toista maailmansotaa vuonna 1939 dieselvoimalla kulki 54 prosenttia maailman laivaliikenteestä. (1, s. 12.) Maailmansodan jälkeen dieselmootorista tuli johtava voimanlähde laivoissa. Myös muita käyttövoimia, kuten kaasuturbiinia sekä ydinvoimaa, on hyödynnetty merenkulussa. Niiden hyvin pienen kokonaisisuuden takia ne on kuitenkin jätetty huomiotta tässä työssä. Alusten valmistuksessa rakenteiden hitsaus yleisty toisen maailmansodan aikana syrjäyttäen perinteiset niitatut teräslevyt. Teräs sekä monet sekoitukset ovat säilyttäneet asemansa johtavana rakennusmateriaalina nykypäivään asti, vaikka rakennemateriaalit ovatkin monipuolistuneet laivateollisuudessa. Turboahdamisen kehittymisen sekä raskaan polttoöljyn käyttöönoton jälkeen hidasnopeuksiset dieselmootorit syrjäyttivät muut voimalähteet. (1, s. 11–13.)

Turboahdettujen dieselmootoreiden käyttö pääasiallisena voimalähteenä on vakiintunut laivoissa. Rahtilaivojen sekä risteilijöiden voimanlähteenä toimii lähes poikkeuksetta hidasnopeuksinen 2-tahtidieselmoottori. Laivojen dieselmootorit jaotellaan eri luokkiin yleisesti niiden käyntinopeuden mukaan, joista kaksi luokkaa on laajasti käytettyjä laivaliikenteessä. Perinteisen ottosyklillä toimivan moottorin käyttö voidaan jättää mainitsematta hyvin pienen volyyminsa puolesta. (4, s. 1.)

Keskinopeiden dieselmootoreiden kierrosluku asettuu 200–1000 rpm:n luokkaan. Moottorityyppi sopii moneen käyttöympäristöön laajan kierrosalueensa ansiosta. Laivakäytön ohella keskinopeat dieselmootorit sopivat myös sähkön tuottamiseen, tai dieselsähköisen propulSION hyödyntämiseen (1, s. 13–18).

Hidaskäyntiset crosshead-dieselmoottorit ovat poikkeuksetta 2-tahtisia. Ominaispiirteinä voidaan mainita korkea hyötysuhde (52 %) sekä soveltuvuus raskaan polttoöljyn käytölle. Tyypillinen pyörimisnopeus on noin 60–150 rpm, mutta yleisesti kaikki alle 200 kierrosta minuutissa pyörivät moottorit luokitellaan hidaskäyntisiksi. Suotuisan käyntinopeuden ansiosta voimansiirtolinja voidaan pitää muuttumattomana potkurille asti etenkin

säätyväpaisen potkurin kanssa, jolloin saadaan korkein mahdollinen hyötysuhde. Sylinterit ovat tyypillisesti rivimuodostelmassa kuten kuvassa 2. Hidas kaksitahtisykli mahdollistaa jäännöspolttoaineiden kuten raskaan polttoöljyn käytön. (4, s. 2–7.)



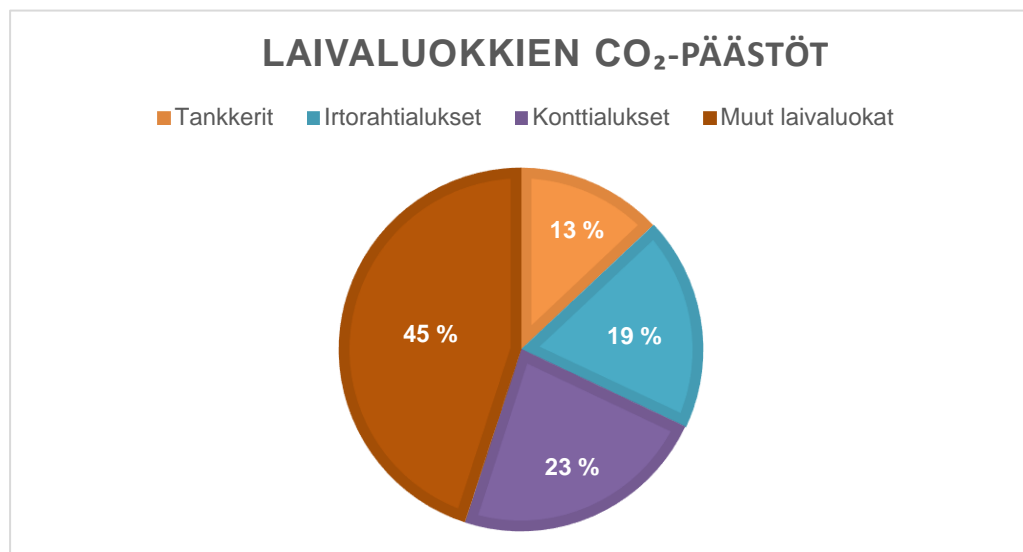
Kuva 2. Hidasnopeuksinen 2-tahtidieselmoottori Wärtsilä RT-flex 35 (3, s. 177).

3 Merenkulun päästöt

3.1 Hiilidioksidipäästöt

Globaali laivaliikenne vastaa arviolta kolmea prosenttia ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasu- sekä hiilidioksidipäästöistä (CO₂). Laivaliikenteestä syntyvien CO₂- ja kasvihuonekaasupäästöjen yhteen laskettu määrä vuosina 2007–2012 ylitti 1000 miljoonan tonnin rajan. Merenkulun päästöjen on ennustettu kasvattavan kokonaismääräänsä sekä prosentuaalista osuuttaan maailman CO₂-päästöistä. IMO:n mukaan laivaliikenteen kokonaispäästöt kasvavat 50–250 % vuodesta 2012 vuoteen 2050 mennessä. Muiden päästölähteiden vähentäessä kokonaispäästöjään merenkulun sektorin arvellaan vastaavan jopa 17 %:sta maailmanlaajuisia CO₂-päästöjä ilman vähentäviä keinoja vuonna 2050. (5, s. 2.)

Globaalin laivaliikenteen alusluokkien CO₂-päästövertailussa eri rahtialukset muodostavat suuren osan päästöjakaumasta. Kuvasta 1 havaitaan miten rahtilaivaliikenne vastaa yhteensä 55 %:sta laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjä. Kuitenkin tankkerit, bulkkialukset sekä konttialukset muodostavat kokonaisuudessaan 84 % kuljetetusta merirahdista. (5, s. 14.) Keskimäärin 83 % laivaluokkien polttoainekulutuksesta koostuu varsinaisesta matkavaiheesta. (5, s.14–15.) Kaupallisen merenkulun osuutta laivaliikenteen kokonaispäästöistä ei voida jättää huomiotta. Päästöjen vähentämiskäytännöt on sovellettava reittinopeuden ympärille, energiatehokkaampaan liikennöintiin pyrkiessä.

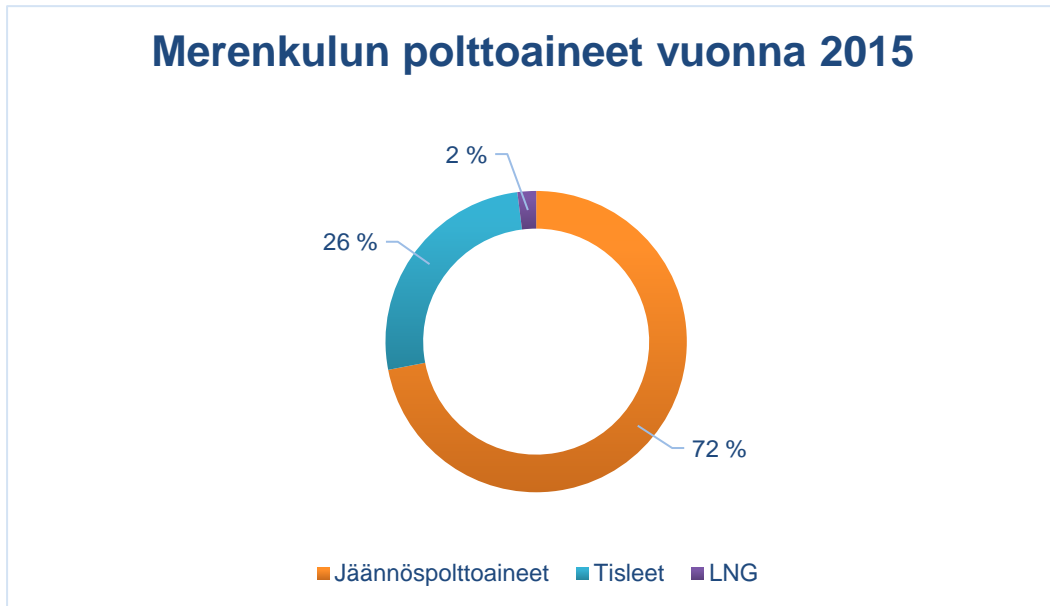


Kuva 3. Laivatyyppien hiilidioksidipäästöjakauma, josta havaitaan rahtiliikenteen suuri osuus laivaliikenteen kokonaispäästöistä

3.2 Merenkulun polttoaineet

Laivat käyttävät pääasiallisesti voimanlähteinään puristussytytteisiä dieselmoottoireita. Alusten käyttämät polttoainelaadut dieselvoimalähteissä vaihtelevat monipuolisesti riippuen käyttökohteesta. Pääasiallisesti merenkulussa käytettävät polttoainelaadut jaetaan tisleisiin (distillates) sekä jäännöspolttoaineisiin (residual). Tisleiden useat eri laadut muistuttavat tieliikenteessä käytettävää EN590-standardin mukaista dieselpolttoainetta, kuten esimerkiksi meridiesel (Marine Diesel Oil, MDO) sekä kaasuöljy (Marine Gasoil, MGO). Bunkkeriöljyksi kutsuttu HFO on alhaisen laadun polttoaine, joka koostuu osin raakaöljynjalostusprosessista syntyvistä jäännösaineista. Nopeakäyntisissä pienikokoisissa < 1000 rpm käyntialueella toimivissa moottoreissa käytetään tisleitä, kun taas hidaskäyntisissä suuren sylinterihalkaisijan omaavissa dieselmoottoireissa pystytään hyödyntämään jäännöspolttoaineita. (6, s. 343.)

Pitkän aikaa dieselmoottorin kasvavan suosion alkuvaiheessa polttoaineena laivaliikenteessä hyödynnettiin tisleisiin luokiteltavia polttoaineita. Raskaan polttoöljyn edullisen hinnan seurauksena sen käyttöpotentiaalia laivakäytössä alettiin tutkia toisen maailmansodan jälkeen. Ongelmia esiintyi raskaan polttoöljyn käsittelyssä ennen palotilaan saattamista sekä moottorien tihenevien huoltovälien kannalta. Kuitenkin vasta 1970-luvun öljykriisin seurauksena polttoaineiden hintojen noustessa myös öljylaatujen hintaerot kasvoivat entisestään. Tämän seurauksena halvempien jäännöspolttoaineiden käyttö yleistyi voimakkaasti keskinopeisissa sekä hidaskäyntisissä voimanlähteissä. Raskaan polttoöljyn suosio nojaa edelleen vahvasti taloudelliseen etuasemaan. (6, s. 343.) Kuva 4 havainnollistaa raskaiden polttoöljyjen korkean suosion laivapolttoaineissa. Globaalia laivakapasiteetista kolme neljännessä käyttää polttoaineenaan HFO:ta (5, s. 11).



Kuva 4. Merenkulun polttoaineiden jakauma vuonna 2015. Polttoaineiden kulutus 298 miljoonaa tonnia globaalisti. (5, s. 11.)

3.3 Rikin ja typen oksidit sekä pienhiukkaspäästöt

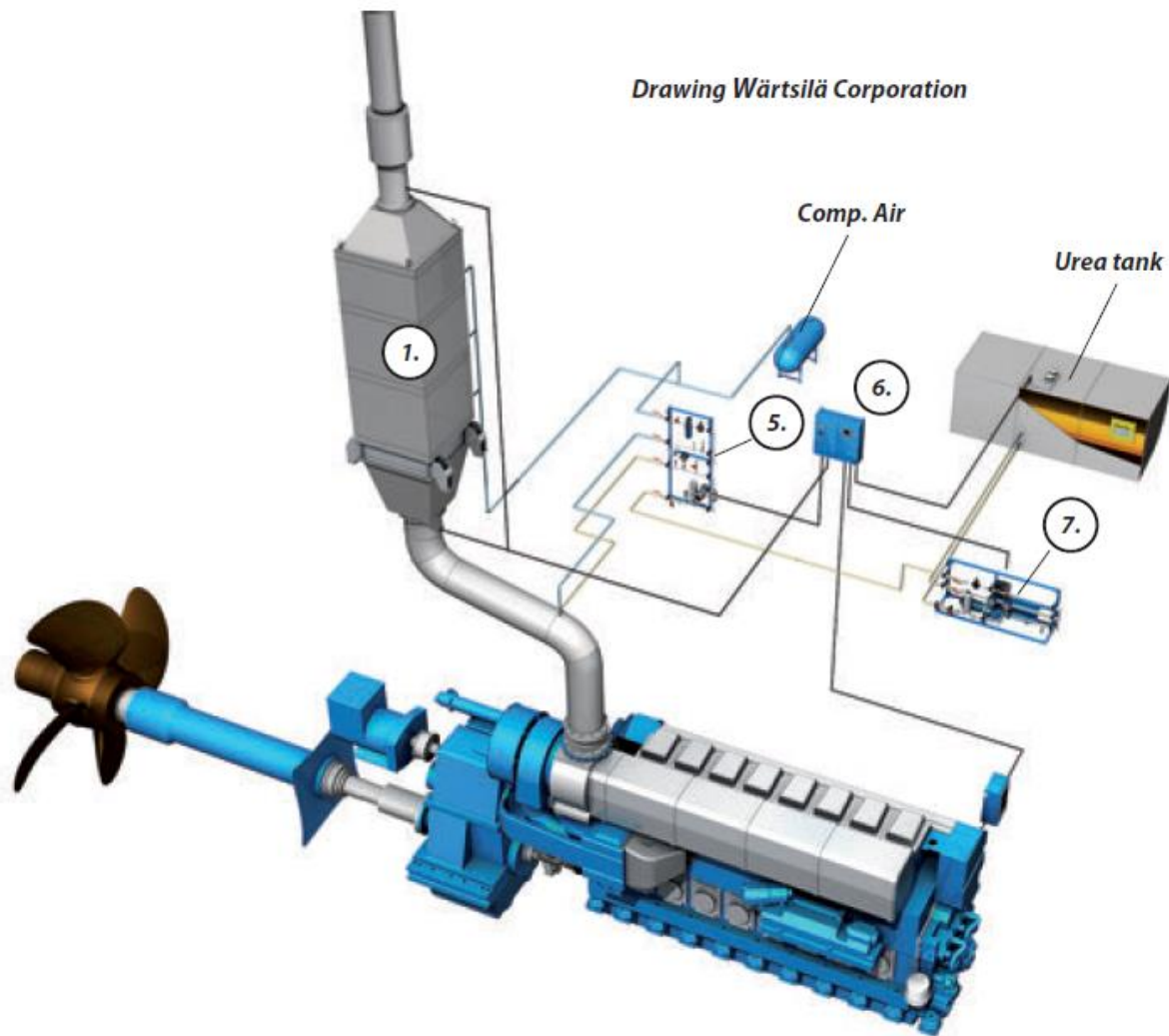
Laivaliikenteestä syntyy hiilidioksidipäästöjen lisäksi haitallisia rikin (SO_x) ja typen oksideja (NO_x). Rikkidioksidipäästöt olivat 2015 maailmanlaajuisesti yli 10 miljoonaa tonnia sekä typpioksidipäästöt 19 miljoonaa tonnia (5, s.19–21). Etenkin rannikoiden sekä satamien läheisyydessä pienhiukkaspäästöt aiheuttavat terveyshaittoja ihmisille sekä eläimille. Rikkidioksidi aiheuttaa lisäksi metsien sekä vesistöjen happamoitumista. Rikin hiukkaspäästöt syntyvät raskaan polttoöljyn sisältämästä rikistä. Polttoaineiden rikkipitoisuudet ovat uusien maailmanlaajuisten säädösten avulla saatu pienenevästi merkittävästi.

Laivaliikenne tuotti taannoin toiseksi eniten rikkipäästöjä koko maailmassa energiateollisuuden jälkeen. 2020 voimaan tulleen rikkidirektiivin seurauksena saa bunkkeripolttoaine sisältää enintään 0,5 % rikkiä globaalisti. (7.) Tämä on ensimmäisiä merkittäviä maailmanlaajuisia edistysaskeleita laivaliikenteen myrkyllisten paikallispäästöjen hillitsemisen kannalta. Kuitenkin esimerkiksi Itämerellä on ollut jo vuodesta 2015 polttoaineissa sallitun rikkipitoisuuden määrä 0,1 %. Vuoden 2015 jälkeen Itämeren rikkipitoisuudet lasivat 88 % vuoden 2014 tasosta. (8.) Haitallisia päästöjä voidaan vähentää myös aluksiin

asennettavilla rikkipesureilla. Pesurit mahdollistavat korkeamman (3,5 %) rikkipitoisuuden omaavan polttoaineen käytön. IMO:n maailmalaajuisen rikkidirektiivin arvellaan estävän yli puoli miljoonaa ennen aikaista kuolemaa ympäri maailmaa.

Pienhiukkaspäästöjen määrän ennustetaan vähenevän uusien rikkiasetusten myötä. Esimerkiksi Itämeren alueella rikkipitoisuusrajoitusten seurauksena pienhiukkaspäästöt laskivat vuonna 2015 yli kolmanneksella edelliseen vuoteen verrattuna. (8.) Typenoksidien määrän on kuitenkin arveltu kasvavan hiilidioksidipäästöjen kasvun trendin mukaisesti. Palotapahtuman huippulämpötilan alentaminen sekä polttoaineen ruiskutustapahtuman keston lyhentäminen kompensoituna suuttimien paineen nostamisella ovat moottoritekniillisiä keinoja vähentää NO_x -päästöjä polttoaineen sytytysprosessin aikana. Uudemmallalla tekniikalla varustetut laivamoottorit tuottavat edeltäjiään vähemmän NO_x -päästöjä. Moottoritekniillinen kehitys on kuitenkin kokonaisvaltaisesti hidasta johtuen rahtilaivojen suhteellisen korkeasta käyttöiästä, joka on keskimäärin yli 20 vuotta. (1, s. 23–24.)

Tehokkaita keinoja typpipäästöjen pienentämiseen pakokaasujen käsittelyllä ovat EGR- ja SCR-järjestelmät. Selektiivinen kalalyttinen pelkistys eli SCR-katalyyttiikka vähentää aluksen NO_x -päästöjä 90 %:lla. Järjestelmän toiminta perustuu urealiuoksen suihkutukseen pakokaasujen sekaan, mikä aiheuttaa pelkistysreaktion. Urealiuoksen sisältämä ammoniakki reagoi typenoksidien kanssa, jolloin syntyy typpikaasua sekä vesihöyryä. Järjestelmän pääkomponentit esitettynä kuvassa 5. SCR-järjestelmiä on myös mahdollista jälkiasentaa laivoihin, jolloin päästään sallittuihin NO_x Tier III -päästöluokan arvoihin. Typenoksidipäästöjä voidaan vähentää myös pakokaasujen takaisinkierätyksellä järjestelmällä (EGR), jota on hyödynnetty jo 90-luvulta lähtien laivoissa. Laivojen typpipäästöjä kontrolloidaan IMO:n kolmivaiheisella NO_x Tier -päästövähennystyökalulla. (3, s. 548.)

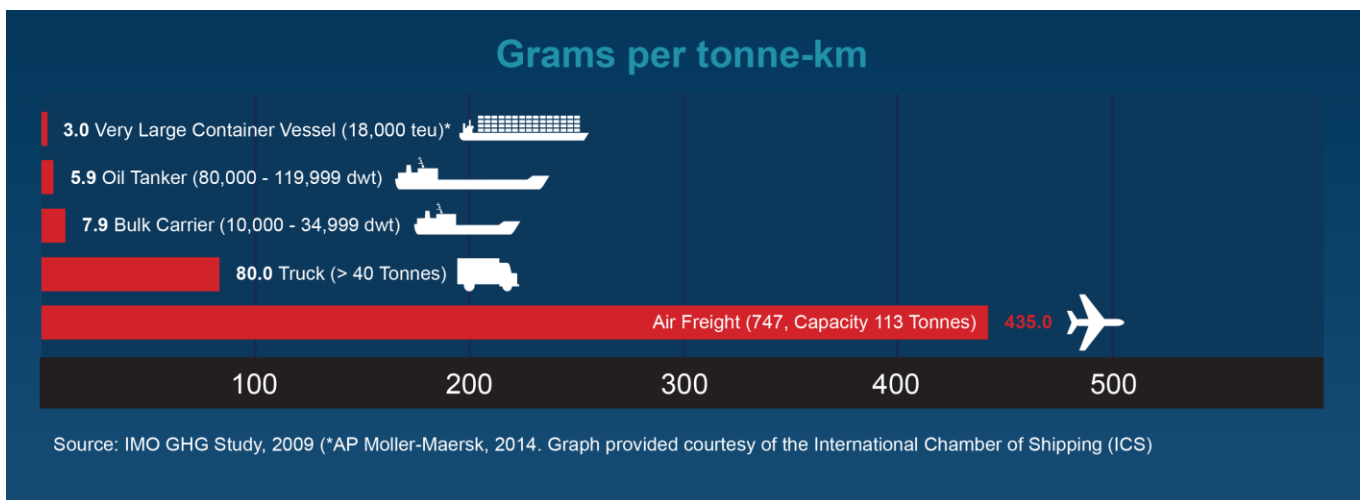


Kuva 5. Wärtsilän SCR -järjestelmä (3, s. 418).

1.	Katalysaattoripesä
5.	Urean annostelulaite
6.	Ohjausyksikkö
7.	Urean pumppausyksikkö

3.4 Liikennemuotojen hiilitehokkuus

Merirahti on kuitenkin kestävin ja vähäpäästöisin rahtimuoto mannertenväliseen tavarankuljettamiseen. Rahtilaivat pärjäävät erinomaisesti eri kuljetustyyppien g CO₂/t km -vertailussa, joka siis tarkoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia syntyy yhden tonnin liikennöimisestä yhden kilometrin matkalla. Liikennöivien alusten koko vaikuttaa laajalti hiilitehokkuuteen tankkereilla sekä irtorahtialuksilla. Mitä suurempi kantavuus (dead weight tonnage, dwt), sen hiilitehokkaampaa alusten liikennöinti on. Kaikkein suurinta vaihtelua päästöissä on kevyimmissä painoluokissa. (1, s. 17.) Erot hiilitehokkuudessa kuitenkin tasaantuvat kantavuuksien noustessa suuriin luokkiin. Irtorahtialuksilla kantavuuden tulisi olla yli 25 000 dwt sekä tankkereilla jopa 80 000 dwt, jotta hiilitehokasta liikkumista voidaan hyödyntää maksimaalisesti. Alla olevan kuvan 6 rahtityyppien vertailussa ei ole mukana rautatieliikennettä, joka on toiseksi hiilitehokkain tapa tavarankuljettamiseen (11 g CO₂/t km). Lentokoneella kulkevan rahdin päästöt ovat ylivoimaisesti suurimpia (1, s. 17). Rahtilaivoista ei tee ympäristölle kuormittavaa sen g CO₂/t km -arvo vaan sen mittava volyyymi, joka vastaa kolmea prosenttia ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä.



Kuva 6. Rahtityyppien vertailu g CO₂/t km -indeksin avulla (10).

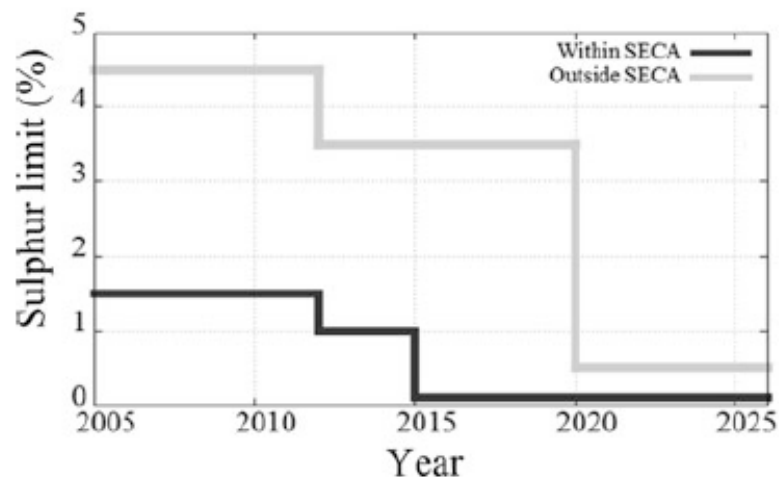
4 Kansainvälinen lainsäädäntö ja yleiset päästötavoitteet

IMO on Yhdistyneiden kansakuntien alaisuudessa toimiva merenkulun lainsäädäntöä hallinnoiva elin. Sen Meriympäristönsuojelukomitea (MEPC, Marine Environment Protection Committee) on asettanut laivaliikenteelle päästötavoitteita MARPOL-säädösten neljännen pykälän mukaisesti. MARPOL-yleissopimus on kehittynyt laajaksi kokonaisuudeksi viime vuosikymmenien aikana. Ensimmäiset siihen kuuluvat säädökset hyväksyttiin jo 1970-luvulla laivaliikenteen ympäristövaikutusten pienentämiseksi. 1990-luvun lopulla alettiin kiinnittää huomiota ilmastonmuutokseen sekä laivaliikenteestä aiheutuviin NO_x- ja SO_x-päästöihin luomalla globaaleja säädöksiä niiden vähentämiseksi. (1, s. 15–16.)

MEPC:n ympäristöstrategiaan kuuluu hiilidioksidipäästöjen leikkaus 30 %:lla vuoteen 2030 mennessä ja 50 %:lla vuoteen 2050 mennessä. Vertailutasona pidetään vuoden 2008 lukuja. Tavoitteena on myös kääntää merenkulun kasvihuonepäästöjen huippu laskuun mahdollisimmat nopealla aikavälillä. IMO:n päästöjenvähennys strategia jaetaan kolmeen eri luokkaan niiden suunnitellun ajankohdan mukaan. Lyhyen aikavälin ratkaisuihin luetaan nesteytetyn maakaasun käytön lisääminen, energiatehokkuustason nostaminen sekä EGR- ja SCR-järjestelmien lisääminen. Keskipitkällä sekä pitkällä aikavälillä tukeudutaan seuraavien sukupolvien biopolttoaineisiin, polttokennoteknologiaan ja runkorakenteiden pintojen kehittymiseen. (1, s. 68.)

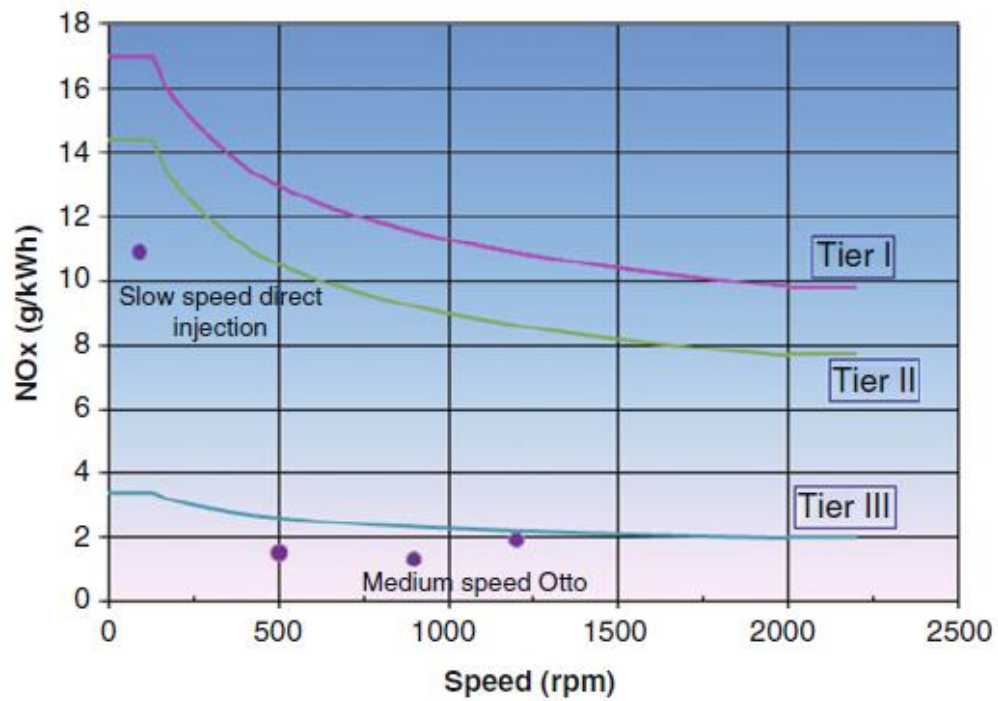
Vuonna 2013 voimaan tulleet EEDI- ja SEEMP-säädökset auttavat varustamoita nostamaan energiatehokkuutta alusten valmistuksessa sekä läpi elinkaaren. Uudet alukset suunnitellaan valmistusvaiheessa energiatehokkuuden EEDI-viiteindeksiä apuna käyttäen (Energy Efficiency Design Index). Laivan suunnitteluvaiheessa lasketaan sille energiatehokkuutta mittaava arvo. Indeksiluku muodostuu laivan konevoiman aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä suhteutettuna laivan kuljettaman lastin määrään. Lasketun indeksiarvon täytyy olla referenssikäyrää pienempi. Jokaiselle alustyyppille on määritetty omat referenssikäyrät, jotka pohjautuvat aiemmin rakennettujen saman laivaluokan keskiarvon perusteella. Laivoissa on myös oltava energiatehokkuuden hallintasuunnitelma (SEEMP), joka toimii energiatehokkuuden työkaluna aluksen elinkaaren aikana. (1, s. 20–21.)

Vuonna 2020 astui voimaan globaali IMO 2020 -asetus, joka sallii polttoaineen rikkipitoisuudeksi enintään 0,5 massaprosenttia aiemman 3,5 prosentin sijaan. Tiukemmat säädökset ovat eritoten niin kutsutuilla SECA-alueilla (Sulphur Emission Control Area), joilla sallitut rikkipitoisuudet ovat 0,1 prosenttia vuodesta 2015 lähtien. Näihin alueisiin kuuluvat Euroopassa Itämeri, Pohjanmeri ja Englannin eteläinen rannikko. Sekä Pohjois-Amerikan itä- ja länsirannikot. (11.) Kuvassa 7 on esitettyinä sallitut rikkipitoisuudet sekä ajankohdat. Rikkiä sisältävän polttoaineen käyttö on sallittua laivan käytettäessä rikkipesureita. Pesurit vähentävät rikkipäästöjä samalle tasolle, kuin käytössä olisi 0,1 % rikkiä sisältävää polttoainetta. Laivayhtiöt asentavat joko pesurit tai jatkavat enemmän rikkiä (3,5 %) sisältävän raskaanpolttoöljyn käyttöä. (14, s. 15.)

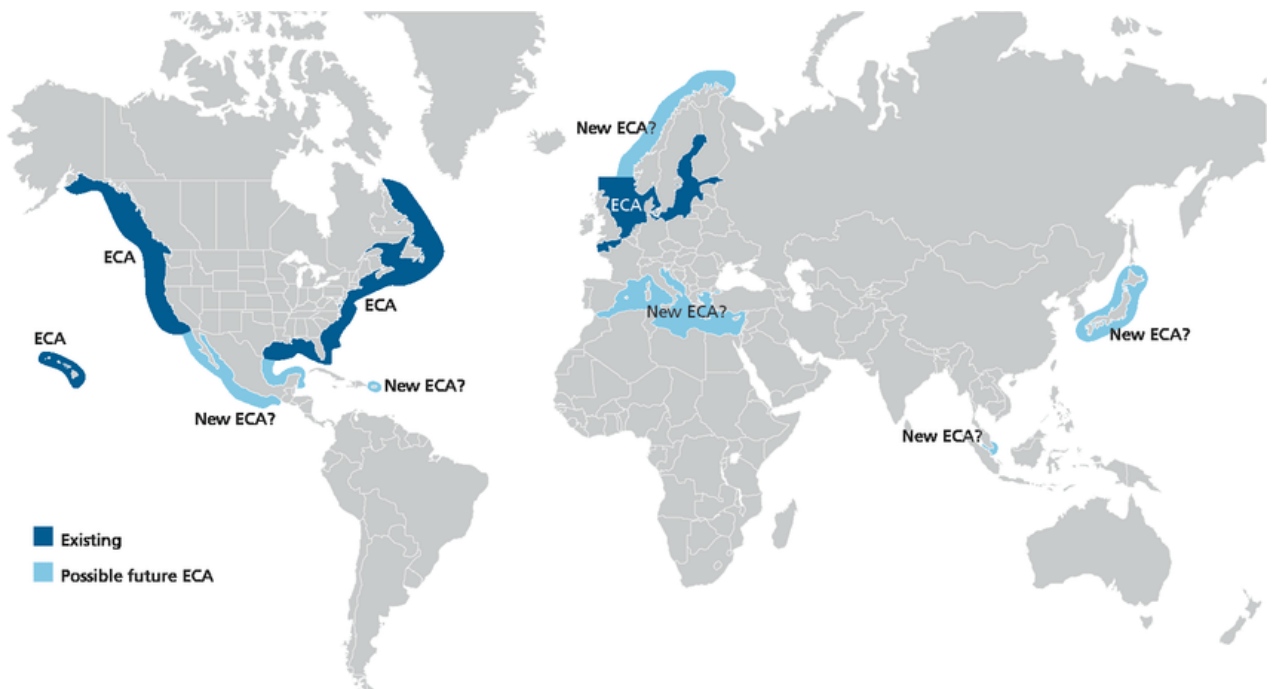


Kuva 7. Sallitut rikkipitoisuudet polttoaineissa aikajanassa (16, s. 252).

Typipäästöjä hallinnoidaan IMO:n kolmivaiheisella NO_x Tier -järjestelmällä. Ensimmäinen taso tuli voimaan vuonna 2005. Seuraava Tier II -taso edellyttää 20 % vähemmän NO_x-päästöjä ensimmäiseen pykälään verrattuna, joka on mahdollista saavuttaa moottoriteknisin ratkaisuin ilman suuria muutoksia. Tier III -tasossa kaikkien merialueiden alukset tulee päästä ensimmäisen ja toisen tason piiriin. Kolmas taso edellyttää lisäksi erillisillä NECA-alueilla (Nitrogen Emission Control Area) vuodesta 2016 valmistettujen laivojen typipäästöjen olevan 80 prosenttia pienemmät verrattuna Tier I -tasoon. Itämerellä Tier III -taso tulee kuitenkin voimaan vasta 1.1.2021. Tier III -taso vaatii käytännössä SCR-tekniikan käytön, tai esimerkiksi käyttövoiman muuttamisen LNG:ksi tai muuksi vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi. Päästöjenhallinta-alueet havainnollistettu kuvassa 8. (11.)



Kuva 8. NOx-tasojen sallitut rajat (16, s. 64).



Kuva 9. Kuvassa globaalit päästöjenvalvonta-alueet, sekä mahdolliset tulevaisuuden jäsenalueet (13).

5 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Merenkulun vaihtoehtoiset polttoaineet koostavat laajan kokonaisuuden monia vaihtoehtoja. Polttoaineet voidaan jakaa fossiilisiin sekä uusiutuviin vaihtoehtoihin perinteiselle raskaalle polttoöljylle. Tässä työssä keskitytään ilmeisempiin vaihtoehtoihin, kuten nesteytettyyn maakaasuun, uusiutuviin vaihtoehtoihin, sekä mahdollisiin pitkän aikavälin mahdollisuuksiin. Uusiutuvien polttoaineiden osalta tarkastellaan niiden täysmittaisen hyödyntämisen ajankohtaa laivasektorilla. Vaihtoehtoisten polttoaineiden avulla saadaan hillittyä haitallisia rikki- ja typpipäästöjä sekä pienhiukkaspäästöjä voimakkaasti. Hiilidioksidipäästöjen määrä vaihtelee polttoaineiden kesken. Selkeää vaihtoehtoa tai suuntausta voimakkaaseen hiilineutraalimpaan suuntaan ei ole saavutettavissa lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä. Monessa tapauksessa nykyisillä nestemäisillä polttoaineilla on pienin haitallinen kasvihuonekaasuvaikutus. (16, s. 447.)

5.1 Nesteytetty maakaasu

Nesteytettyä maakaasua (LNG) käyttäviä aluksia on kasvavassa määrin meriliikenteessä. Tällä hetkellä LNG:llä kulkevia laivoja on noin 2 % globaalista laivakapasiteetista (5, s. 11). LNG on vaihtoehtoisista polttoaineista pisimmälle edennyt jakeluinfrakstruktuurin sekä bunkrauksen kannalta. Uusien rikkiasetusten voimaantultua, arvellaan LNG:n suosion kasvavan entisestään päämääräisenä polttoaineena. Nesteytetyn maakaasun palamisesta syntyy yli 85 % vähemmän NO_x-päästöjä verrattuna raskaaseen polttoöljyyn, minkä lisäksi se aiheuttaa karkeasti arvioituna 20–25 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä. (1, s. 29.) Puhtaamman palamisen sekä olemattoman rikkipitoisuuden takia LNG:n käyttö on todettu hyödylliseksi etenkin haitallisten typpi- ja rikkipäästöjen ehkäisemisen kannalta. LNG:tä polttoaineenaan käyttävä alus luokiteltaisiin suoraan NO_x Tier III -päästöluokkaan, jolloin erillisille pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmille ei olisi tarvetta. Hiilidioksidipäästöjä syntyy kuitenkin aina fossiilisten polttoaineiden käytöstä, eikä esimerkiksi LNG ole pitkän aikavälin päästötavoitteiden kannalta tarpeeksi tehokas ratkaisu itsessään hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. (1, s. 29–31.)

LNG koostuu 90-prosenttisesti metaanista, jota vapautuu epätäydellisessä palamisprosessissa pieniä määriä ilmakehään. Koska metaani on hiilidioksidia haitallisempi kasvihuonekaasu, pienentää se LNG:n ympäristöpotentiaalia. (16, s. 441.) HFO:n ja LNG:llä fyysikaalisten eroavaisuuksien takia kummankin polttoaineen moottoriratkaisut sekä säi-

löminen tapahtuvat erilaisin keinoin. LNG vaatii olomuotonsa takia nelinkertaisen säilömistilan sekä erilaiset kaasulle sopivat linjastot verrattuna perinteisiin polttoöljyihin. (1, s. 29.) LNG:tä voidaan pitää vaihtoehtona lähinnä uusille aluksille, sillä järjestelmien jälkiasenteisuutta ei pidetä yleisesti kustannustehokkaana vaihtoehtona. Konversion kannattavuuteen vaikuttavina tekijöinä pidetään aluksen ikää sekä tyyppiä. Dual fuel -moottorit mahdollistavat kaasun sekä öljyn käytön polttoaineena. LNG:n saatavuus sekä kysyntä on ollut globaalissa kasvussa viime vuosina. Jakelu- sekä bunkrausinfrastruktuurin rakentaminen vaatii mittavia investointeja sekä tukea valtioilta. LNG-terminaaleja voidaan tulevaisuudessa hyödyntää uusiutuvien vaihtoehtojen kuten LBG:n käytön yleistyttyä. Tällä hetkellä LNG pystyy kilpailemaan ainoastaan hinnoittelullaan HFO:n kanssa. (14, s. 29–30.)

5.2 Uusiutuvat vaihtoehdot

Nesteytettyä biokaasua (LBG, Liquefied Bio Gas) sekä biometanolia pidetään uusiutuvina vaihtoehtoina laivoille. Metanolille on ominaista LNG:n tavoin hyvin pienet NO_x-päästöt sekä alhainen rikkipitoisuus. Normaaliolosuhteissa nestemäisen olomuotonsa ansiosta se on helpompi varastoida kuin LNG. Biomassasta valmistetun metanolin sekä biokaasun elinkaaripäästöt ovat matalat. Metanolin käyttö edellyttää moottoritekniisten ratkaisujen muutoksia, vaikka puhutaan nestemäisestä polttoaineesta. Yksi biopolttoaineiden ongelmista liittyy sen huonoon säilymiskestävyyteen ja hapettumiseen sekä kasvuston kehittymiseen varastoitaessa. (16, s. 446.) Metanolin ja biokaasun tuotannollinen infrastruktuuri laivateollisuuden vaatimaan käyttöön on hyvin puutteellista tällä hetkellä. Biopolttoaineiden tuotanto meriteollisuuden tarpeisiin kattaa tällä hetkellä arviolta vain 15 % kokonaiskysynnästä. Tislepolttoaineiden kuten MDO:n kanssa pystyy kuitenkin kilpailemaan moni uusiutuva vaihtoehto. (14, s. 22–31.)

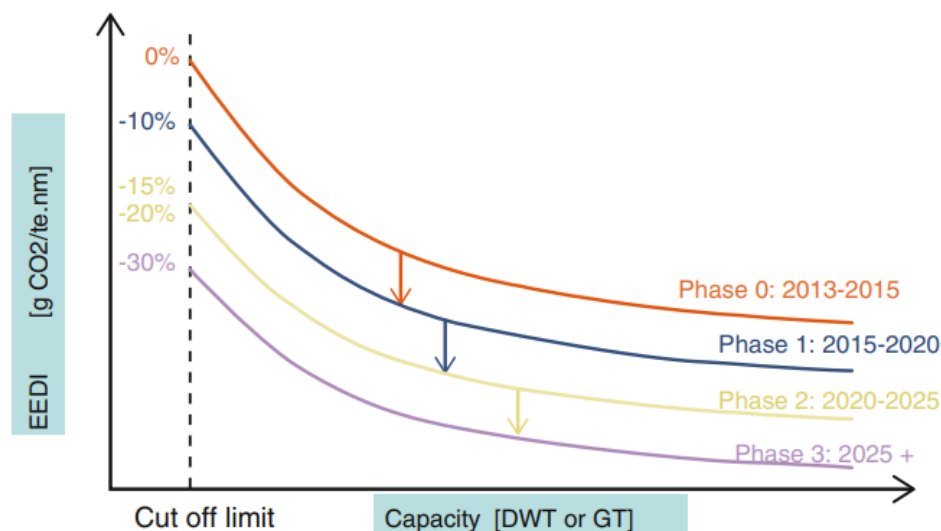
5.3 Pitkän aikavälin vaihtoehdot

Laivaliikenteen voimansiirron sähköistäminen ei ole ollut yhtä innovatiivista kuin esimerkiksi tieliikenteen. Meriliikenteen valtava voimantarve on suuri kompastuskivi täyssähköiselle propulsiolle. Nykyisellä akkuteknologialta vain lyhyen matkan liikennöinti on mahdollista esimerkiksi lyhyen välin matka-aluksissa, sekä lautoissa. Polttokennot tuottavat sähköä hapetusreaktiolla ulkoisen reaktioaineen avulla. Reaktioaineena voi toimia esimerkiksi vety, jonka palamistuote on vesi. Polttokennojen ongelmiksi muodostuvat

rajallinen käyttöikä sekä suuri tilantarve kennojen ja polttoaineen säilömisen kannalta. (1, s. 43–47.) Polttokennojen khk-jalanjälki riippuu vahvasti käytettävästä polttoaineesta. Tulevaisuudessa pitkällä aikavälillä polttokennoteknologian kehittyminen laivakäyttöön, sekä mahdollinen akkuteknologian läpimurto mahdollistaisi enemmän hybridi- sekä täys-sähköisellä propulsiolla kulkevia aluksia. (1, s. 42–43.)

6 Energiatehokkuus

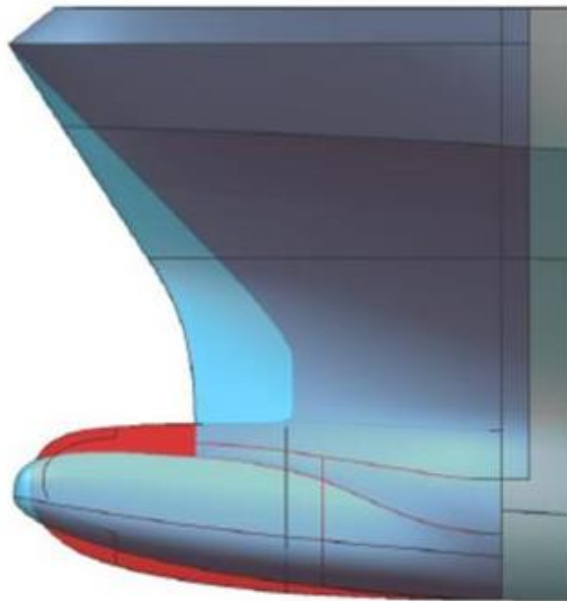
Alusten energiatehokkuudella on merkittävä rooli päästötavoitteiden saavuttamisen, sekä kustannustehokkaamman liikennöinnin kannalta. Energiatehokkuuden kasvattaminen tunnistetaan yhtenä keinoja vähentää laivojen päästöjä tulevaisuuden tavoitteiden saavuttamiseksi. Kansainvälisen merenkulkuorganisaation asettama energiatehokkuusindeksi EEDI ohjaa varustamoita laivojen valmistuksessa energiatehokkaampaan suuntaan. Indeksikoostuu neljästä tasosta, joiden ajankohdat on esitetty kuvassa 10. SEEMP-työkalu mahdollistaa energiatehokkuuden seuraamisen aluksen elinkaaren aikana esimerkiksi matkanopeuden seuraamisella ja optimoinnilla. Rahtilaivaliikenteen juoksevista kuluista jopa puolet voi koostua yksin polttoainekuluista. Laivoihin on saatavilla useita energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja myös jälkiasenteisina ratkaisuina, joiden kustannukset saadaan lyhyellä aikavälillä katetuiksi esimerkiksi polttoainekulujen vähentymisenä. Jälkiasenteisissa parannuksissa voi esiintyä ristiriitoja operaattorin sekä laivavarustajan kesken, sillä varustamot usein kustantavat asennettavat parannukset, joista operaattorit hyötyvät polttoainemenojen leikkaamisella. Monet ratkaisut tulisi kuitenkin ottaa huomioon laivaa suunniteltaessa. Energiatehokkuuden teknologiset parannukset voidaan jakaa moottoritekniisiin ratkaisuihin sekä rungon ja propulsiolaitteiden parannuksiin. On olemassa myös parannuksia, joiden teknologinen osuus jää pieneksi kuten matkanopeuden hidastaminen. (15.)



Kuva 10. Energiatehokkuusindeksin vaiheet (EEDI) (16, s.106).

6.1 Rungon rakenteet sekä propulsiolaitteet

Yleinen periaate laivan rakentamisessa oli suunnitella rungon muodot nopeuden ja syvyyksen mukaan. Polttoainehintojen noustessa alettiin kiinnittää huomiota näihin suunnittelukohtiin, jotka kuitenkin harvemmin toteutuivat aluksen operatiivisessa käytössä. Alukset olivat usein konevoimaltaan tehokkaampia kuin suunniteltaessa, minkä takia laiva ei operoinut potkurille ja rungolle optimoitua etenemisnopeutta. Rungon muotojen suunnittelu koostuu usean tekijän summasta. Uuden aluksen suunnittelussa tulisi kerätä mahdollisimman paljon dataa liikennöivistä saman luokan aluksista, tai vastaavasti ottaa aluksen tuleva toimintaympäristö sekä kuljettavat reitit huomioon. Runkorakenteiden oikeanlaisen suunnittelun hyödyt näkyvät aluksen energiatehokkuudessa muutaman prosenttiyksikön eroina. Operaatioprofiilin merkitys korostuu etenkin suuren keulabulbin omaavilla nopeilla aluksilla. Huomattavia parannuksia saadaan myös bulkkialuksilla ja tankkereilla. (16, s. 35–41.)



Kuva 11. Keulabulbin profiilin muokkaus CFD:tä apuna käyttäen (17).

Suurten valtamerialusten rungon etuosassa vesirajassa sijaitsee usein pisaranmuotoinen keulabulbi (Bulbous Bow). Sen tehtävänä on muokata veden virtausta aluksen ympärillä vähentämällä aluksen kokonaisvastusta, sekä näin pienentää liikkumiseen tarvittavaa energiaa. Keulabulbin suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon laivan tyyppi

sekä käyttöympäristön luontoisuus. Nykyaikaiset nestedynamiikkaa simuloivat tietokoneohjelmat (Computational Fluid Dynamics, CFD) pystyvät mallintamaan tarkasti veden aiheuttamaa vastusta ja propulsioon ominaisuuksia tyynissä olosuhteissa. (16, s. 39.) Keulabulbi voi lisätä energiankulutusta virheellisesti suunniteltuna tai väärissä käyttöolosuhteissa. (9, s. 55.) Aluksien keulabulbin optimaalinen suunnittelu operatiivisen profiilin mukaan voisi parantaa energiatehokkuutta keskimäärin 5 %, kuten kuvassa 11 on havainnollistettu. Keulabulbin päivitys voidaan toteuttaa jälkiasenteisina kuivatelakoinnin yhteydessä. (15, s. 22.)

Laivan rungon vastusta voidaan pienentää erilaatuisilla pinnoitteilla. Anti fouling -maalit auttavat pitämään rungon mahdollisimman pitkään kasvustosta puhtaana, täten ehkäisemällä kitkahäviöitä. Monet valmistajat tarjoavat useita vaihtoehtoja pinnoitteille. Suurin osa laivatyypeistä telakoidaan vähintään kerran viidessä vuodessa, joten pinnoitteiden vaihtaminen energiatehokkuutta lisääviin olisi helppo toteuttaa. Kuitenkin vain pieni osa laivoista hyödyntävät uusimman teknologian pinnoitteita. Etenkin rahtilaivoissa, joiden polttoainekulutus perustuu pitkälti matkavaiheeseen, voidaan käytetyn polttoaineen määrässä säästää keskimäärin 5 prosenttiyksikköä. (15, s. 23.) Anti fouling -pohjamaalit sisältävät eliöille myrkyllisiä biosidejä, jotka estävät eliöiden kiinnittymisen aluksen runkoon. Pohjamaalit ovat myös ympäristökysymys, sillä aiemmin tehokkaina pinnoitteina pidetyt tinapohjaiset tributyyliitina (TBT) maalit kiellettiin lopulta laivakäytössä vuonna 2008 ympäristökuormittavuutensa takia. Nykyiset maalit koostuvat enimmäkseen kupari- ja sinkkiyhdisteistä. Myös kuparipohjaisten pinnoitteiden ympäristökäyttäytymisestä ollaan huolissaan. (1, s. 63.)



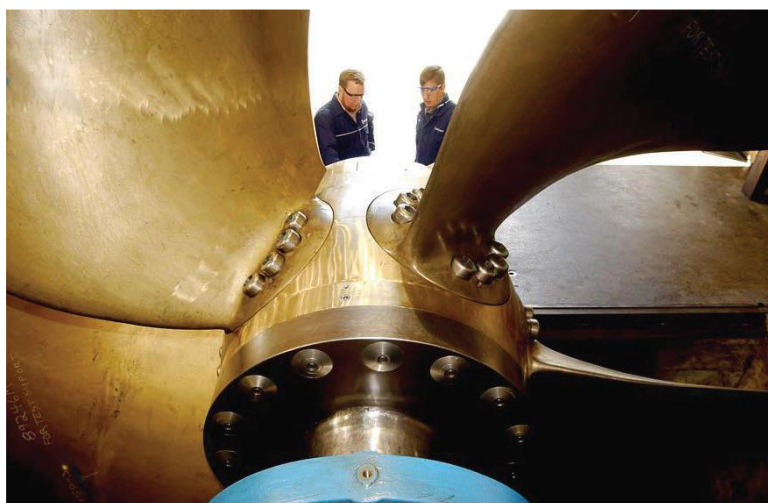
Kuva 12. Laivan maalikerrokset. Anti fouling -pinnoitteet ovat tärkeitä kasvuston kiinnittymisen sekä kitkaominaisuuksien kannalta (15, s. 23.)

Laivojen vetolaitetyypit voidaan jakaa tyypillisesti kiinteä- sekä muuttuvalapaisiin potkureihin. Kiinteälapainen potkuri on yleinen ratkaisu veneistä laivoihin, sekä varsinkin rahtialuksilla yksinkertaisen rakenteensa ja usein suuren kokovaatimuksien takia. Kuvassa 13 on tyypillinen kolmilapainen kiinteän nousun potkuri. Potkuri mitoitetaan käyttökohteeseen nousun sekä lapojen lukumäärän avulla. (16. s. 45.)



Kuva 13. Kolmilapainen kiinteän nousun potkuri (16, s. 45.).

Muuttuvanousuisen potkurin lapojen kulmaa saadaan säädettyä, jolloin voimansiirtoakseli voi pyöriä vakionopeudella. Lapojen kiinnitykset akseliin kuvassa 14. Systemin monimutkaisuudesta huolimatta sen tuo monia hyötyjä. Järjestelmä mahdollistaa myös hybridiratkaisun sekä akseligeneraattorin käytön. Järjestelmä on yleisempi suurilla autolau-toilla sekä pienimmillä rahtialuksilla. (16, s. 44.)



Kuva 14. Muuttuvan nousun potkuri (1, s. 56.).

Perinteisen potkuriperäsin järjestelmän lisäksi puhutaan ruoripotkurista, jossa potkuri kääntyy 360 astetta pysty akselinsa ympäri toimien samalla peräsimenä ja lisäten aluksen hallittavuutta pienissä nopeuksissa huomattavasti. Kuvan 15 ratkaisussa kaksi Azipod-järjestelmää. Ruoripotkuriin perustuvassa Azipod-järjestelmässä sähkömoottori sijaitsee itse potkuriyksikössä poistaen erillisen voimansiirto akselin tarpeen sekä vähentäen mekaanisia häviöitä merkittävästi. Järjestelmän monimutkaisuus ja hintavuus ovat osakseen rajoittaneet käyttöä rahtilaivaliikenteessä, vaikkakin kehitystyö on nykypäivänä pitkälle edennyt. Azipodin käyttö parantaa propulsiojärjestelmän hyötysuhdetta perinteiseen potkuriin verrattuna arviolta 10 %. (16, s. 46.)



Kuva 15. Sähkömoottorin omaava Azipod-ruoripotkurijärjestelmä (3, s. 37.).

6.2 Energiansäästölaitteet

Potkurijärjestelmien hyötysuhteet vaihtelevat 50 ja 70 prosentin välillä. Potkurista aiheutuu aksiaalisia, rotaationaalisia sekä kitkahäviöitä. Näitä häviöitä pyritään ehkäisemään energiatehokkuutta parantavilla ratkaisuilla. Rotaationaalisia häviöitä pyritään ehkäisemään virtauksen muokkaamisella ennen potkuria sekä potkurivirtauksen jälkeen. Lukuisia potkurijärjestelmien energiatehokkuutta parantavia välineitä on markkinoilla, joiden hyödyt ovat yksilökohtaisia riippuen aluksen tyypistä sekä käyttöprofiilista. Tehokkaimpia ratkaisuja potkurivirran hyödyntämiseen ovat potkurin päätykappaleen evät, peräsinbulbi, sekä potkurin pyörimissuunnan mukaan muokattu peräsin. (16, s. 47–48.)

Potkurin sisäänvirtausta muokkaamalla saadaan potkurivirrasta tasaisempi. Virtauksen muoto ennen potkuria pyritään muuttamaan vastakkaiseksi verrattuna potkurin pyörimissuuntaan kuten kuvassa 16. Kontrolloidun potkurivirtauksen ansiosta rotationaalisia häviöitä pystytään ehkäisemään ja parantamaan potkurin hyötysuhdetta 3–6 % käyttökohteen mukaan. Kuvassa potkuriakselin ympärillä olevan kehän sisällä on potkuriin saapuvan virtauksen suuntaa ohjaavat evät. (16, s. 48–49.)



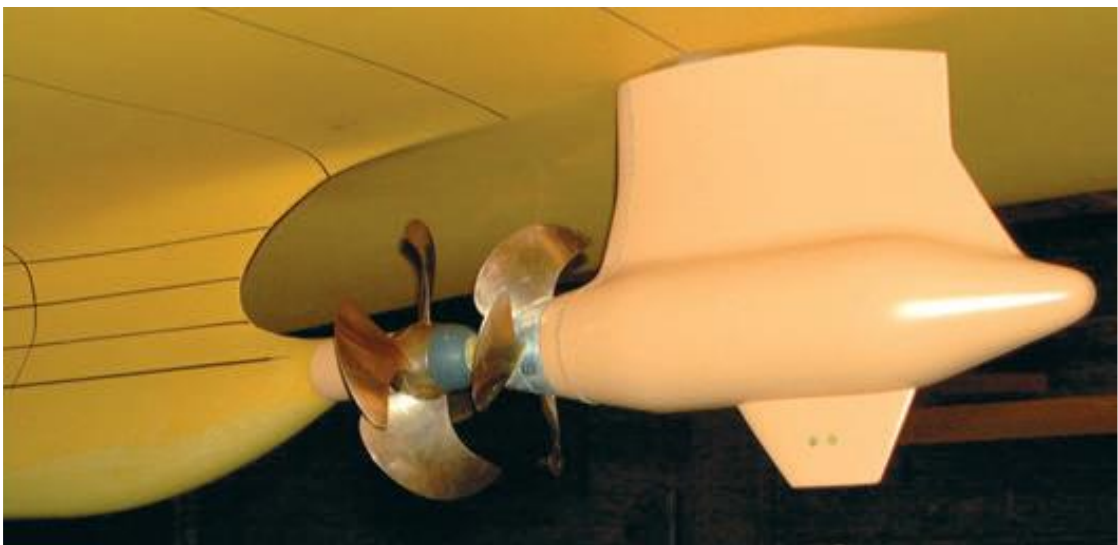
Kuva 16. Becker Marine Systemsin valmistama Mewis -kanava (16, s. 49.).

Kontrolloidun potkurivirtauksen edut voidaan hyödyntää myös vastakkaiseen suuntaan pyörivien potkureiden avulla. Kahta potkuria voidaan hyödyntää samassa akselilinjassa joko kiinteästi tai erillisille rakenteille asennettuna. Puhutaan niin sanotusta CRP-potkurijärjestelystä eli vastasuuntiin pyörivistä potkureista. CRP-järjestelmässä jälkimmäinen potkuri käyttää ensimmäisen potkurin aiheuttamaa pyörimisvirtausta estääkseen häviöiden syntymistä (kuva 17). Näin saadaan huomattavia etuja perinteisiin ratkaisuihin verrattuna. Tyypillisesti jälkimmäisen potkurin halkaisija on etummaista potkuria pienempi kavitaatoriskin pienentämiseksi. CRP-ratkaisut säästäisivät polttoainekulutuksessa 6–20 % kohteen mukaan. Suurin hyöty saavutettaisiin aluksilla, joiden potkurien kuormitus on korkea kuten nopeilla konttialuksilla sekä Ro-Ro -aluksilla. (15, s. 9–10.)



Kuva 17. Vastasuuntiin pyörivien potkureiden toimintaperiaate (15, s. 10.).

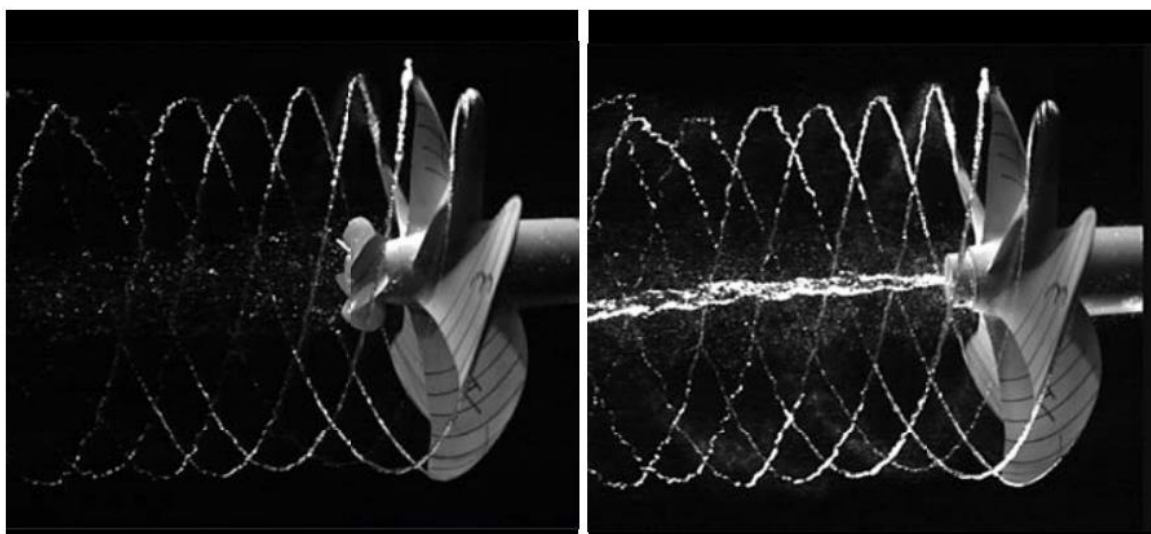
Takapotkuri voi toimia peräsimenä erilliseen kapseliin asennettuna, mikä lisää aluksen ohjattavuutta. Tässä järjestelmässä etummainen potkuri on sijoitettu kiinteästi, ja jälkimmäinen potkuri on erillisessä pysty akselissa. Voima jakautuu 75/25 kiinteästi asetetun pääpotkurin hyväksi. Kyseisellä voimanjaon suhteella on todettu parhain hyötysuhde kuvan 18 kaltaisilla järjestelmillä. Ratkaisu parantaa hydrodynaamista hyötysuhdetta jopa 10 % suurilla konttialuksilla. (3, s. 474.)



Kuva 18. Vastakkaisesti suuntiin pyörivä potkuriasetelma, jossa peränpuoleinen potkuri toimii peräsimenä (3, s. 474).

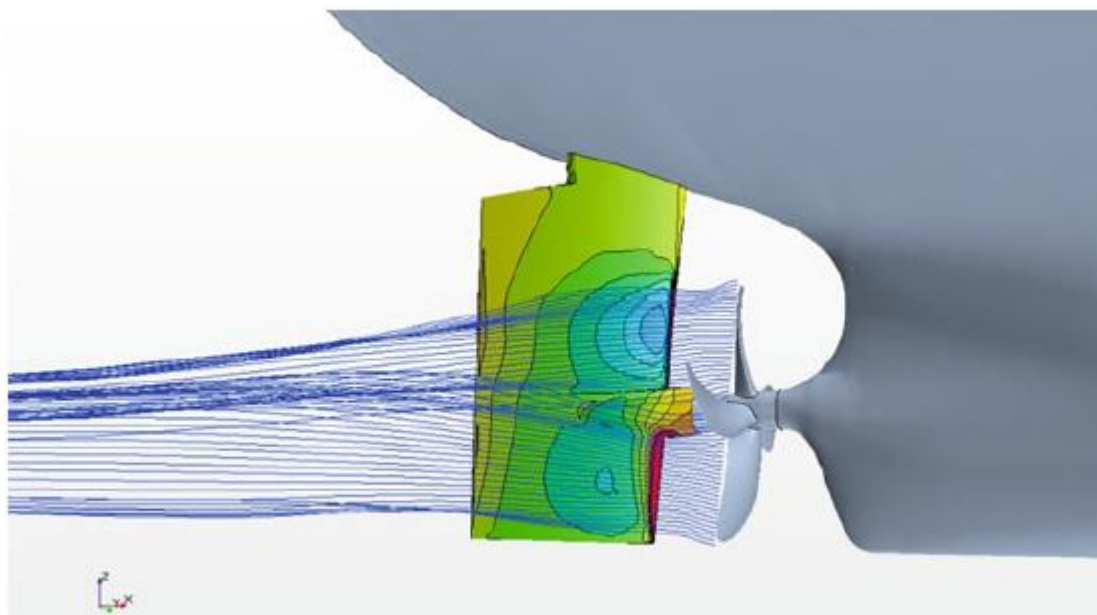
Potkurin aiheuttamaan virtausta voidaan muokata energiatehokkaammaksi useilla ratkaisuilla, joita osaa voidaan toteuttaa myös jälkiasenteisina. Laitteiden on tarkoitus optimoida veden nopeuden jakautumista potkurivirran jälkeen sekä ehkäistä potkurivirran häviöitä. Muutokset kohdistuvat joko potkuriin, peräsimeen tai molempiin. (15, s. 10–11.)

Potkuriakselin ympärille asennettavat evät luovat näennäisesti toisen pienemmän potkurin, jonka tarkoitus on estää potkurin navan synnyttämää pyörrettä. Ratkaisu lisää potkurin kokonaistyöntövoimaa 3–5 %. Pyörre-evien asennukseen ei tarvittaisi runkoon tehtäviä muutoksia ollenkaan. Pelkästään potkurin päätykappaleen vaihto evillä varustettuun on tarpeellinen. Kuvan 19 oikeanpuoleisesta potkurista erottuu selkeästi potkurin navan aiheuttama pyörre, jota ei esiinny pyörre-evillä varustetussa vasemmanpuolen potkurissa. (15, s. 11.)



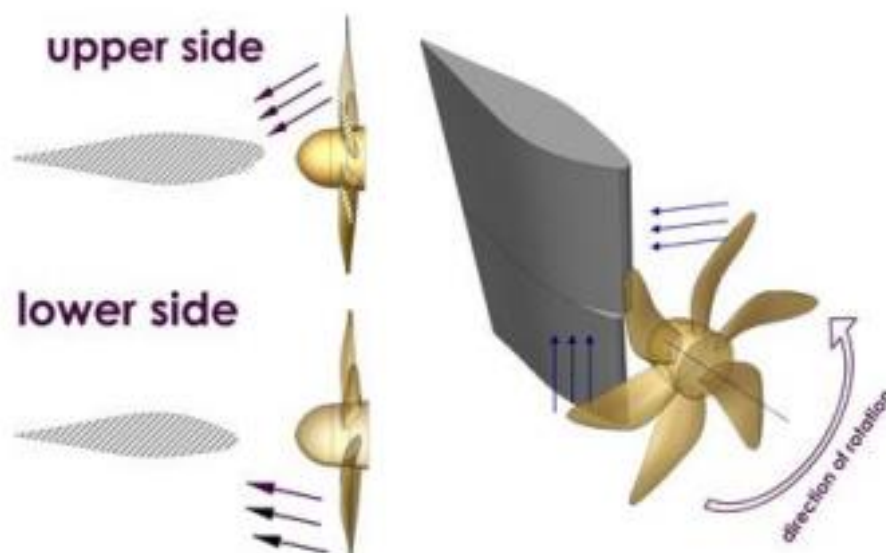
Kuva 19. Pyörre-evien vaikutus potkurin navan virtaukseen (15, s. 11.).

Aiemmin mainittua keulabulbin toimintaperiaatetta voidaan soveltaa myös peräsimeen. Peräsinbulbi tasoittaa peräsimeen tulevaa virtausta sekä pienentää potkurin vastusta. Rakenne poistaa potkurin navan aiheuttaman pyörteen samaan tapaan kuin aiemmin mainitut potkurievät. Nykyiset CFD-menetelmät takaavat parhaan hyötysuhteen omaavan lopputuloksen. Potkurivirtauksen simulointi kuvassa 20. Bulbeja on mahdollista jälkiasentaa laivoihin suhteellisen pienellä investoinnilla. Ratkaisu on jo laajasti käytössä useilla alustyypeillä. Peräsinbulbi on muokattavissa muiden ratkaisujen ohella kuivatelakönnin yhteydessä. (15, s.14.)



Kuva 20. Peräsinbulbin CFD-simulaatio (16, s. 50.)

Peräsimen suunnittelulla voidaan vaikuttaa kitkavoimien vähentämiseen. Perinteisen symmetrisen peräsimen muotoilu ei ota huomioon potkurin lavoista syntyvää voimakasta virtausta. Epäsymmetrinen peräsin (twisted rudder) on jaettu kahteen eri muotoon, potkurin keskilinjan ylä- ja alapuoleen kuten kuvassa 21. Ratkaisun on tarkoitus ohjata potkurivirtausta tasaisemmin peräsimeen vähentäen vastusta sekä ehkäisemällä eroosio- ja kavitaatio-ongelmien vaikutusta. (15, s. 12–13.)



Kuva 21. Epäsymmetrisen peräsimen muotoilu (15, s. 13.).

6.3 Moottoritekniset ratkaisut

Laivadieselmoottorit ovat saaneet nykymuotonsa pitkän tuotekehityksen seurauksena. Menneinä vuosikymmeninä moottorikehityksessä pyrittiin hyötysuhteen parantamiseen, sekä operatiivisen käyttöiän maksimoimiseen. Nykyisin ympäristökysymykset ovat tärkeämmässä roolissa kuin aiemmin. (1, s. 21–23.) Pakokaasujen epäpuhtauksien määrää voidaan ehkäistä moottoriteknisillä ratkaisuilla sekä pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmillä. Käytettävällä polttoaineella on erittäin tärkeä rooli niin hiilidioksidi- kuin haitallisten rikki- ja typpipäästöjen vähentämisen kannalta. Turboahtamisen kehitysvaihtoehdot ja polttoaineensyöttöjärjestelmien edistyksellisyys on parantanut dieselpolttomoottorin hyötysuhdetta. Elektronisen polttoaineensyötön ansiosta voidaan sylintereiden palotapahtumaa säätää yksilöllisesti monien käyntiprosessia seuraavien anturien avulla. Dieselteknologiaa kehitetään edelleen voimakkaasti tulevaisuuden tarpeisiin. Moottorivalmistajat ovat nykyään huomioineet tarpeet vaihtoehtoisille polttoaineille, dual fuel -moottoreille sekä pakokaasujen jälkikäsitteilylle. (1, s. 22–26.)

Yksi melko laajasti testattu innovaatio dieselmoottorien osalta on Miller-sykli, jonka tarkoituksena venttiilien ajoitusta muuttamalla saatava korkeampi teho. Imuventtiilin sulkeemisella aikaisemmin saadaan matalampi loppulämpötila, mutta sama paine puristustahdilla. Lämpötilaa kompensoidaan korkeammalla ahtopaineella. Kierron ansiosta palotapahtuman lämpötilaa saadaan laskettua huomattavasti. Näin saadaan etenkin typen oksidipäästöjä leikattua. Miller-sykli on mahdollista toteuttaa nelitahtisissa laivamoottoreissa. (1, s. 23.)

6.4 Matkanopeuden hidastaminen

Yksi toteutettavissa oleva ratkaisu laivaliikenteen päästöjen vähentämiseksi on matkanopeuden hidastaminen. Tutkimukset aiheesta osoittavat nopeuksien vähentämisellä olevan huomattavia hyötyjä kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta. Yleistä trendiä vastaan vuosien 2013–2015 välillä havaittiin tankkereiden sekä rahtilaivojen liisänneen matkanopeuksiaan, mikä lisää polttoaineen kulutusta. (15, s. 23.)

Merenkulussa nopeuden muuttumisella on välitön seuraus polttoaineen kulutukseen. Tarvittavan tehon muutos kasvaa potenssilla nopeuden kasvaessa. Laivanopeutta laskettaessa kymmenellä prosentilla liikkumiseen vaadittu teho vähenisi 27 prosentilla. Laivan kulkiessa lyhyemmän matkan samassa ajassa hitaamman nopeuden takia saadaan

kokonaisenergian tarvetta vähennettyä 19 %. Näin polttoaineenkulutus laskee energiantarpeen vähentyessä. Vastaavassa tilanteessa jos laivan kulkunopeutta nostetaan 18 solmusta 24 solmuun, saadaan polttoaineenkulutus kaksinkertaistettua. Amiraliteettikaavaa sovelletaan merenkulun nopeuden muutoksissa. Kaavassa kulutuksen suhde nopeuteen kasvaa potenssissa kolmanteen suunnittelunopeuden molemmin puolin. (18.)

$$F = F^* \left(\frac{S}{S^*} \right)^a$$

F = polttoaineen kulutus (t/vrk)

F* = polttoaineenkulutus suunnittelunopeudella

S* = suunnittelunopeus

S = todellinen nopeus

a = vakio, arvo noin 3

Suunniteltua hitaamman matkanopeuden takia moottori käy heikommalla hyötysuhteella. Alhaisen kuorman hyötysuhdetta voidaan nostaa esimerkiksi polttoaineen ajoituksen muuttamisella sekä turboahtimen geometrian muuttaminen alhaisemmilla kierroksilla tehokkaammaksi. Etenkin vanhemmissa moottoreissa on potentiaalia osakuormahyötysuhteen parantamiselle niiden alhaisemman puristussuhteen ansiosta. Matkanopeuden hidastaminen lisääisi operatiivisen laivamäärän tarvetta, mikäli tavaramäärät halutaan pitää entisellä tasolla. (15, s. 5.)

Taulukko 1. Hiilidioksidipäästöjen aleneminen suhteessa matkanopeuden muutokseen.

CO ₂ Säästöt	Nopeuden muutos
13 %	-10 %
24 %	-20 %
33 %	-30 %

7 Johtopäätökset

Merenkulku vastaa lentoliikenteen ohella suurimmasta osasta liikenteen synnyttämistä päästöistä. Laivaliikenne aiheuttaa kolme prosenttia kaikista ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä. Dieselmoottorit ovat vakiintuneet laivojen voimanlähteinä hyötysuhteensa ansiosta. Kolme neljäsosaa laivakapasiteetista käyttää polttoaineenaan raskasta polttoöljyä, jonka käytöstä syntyy khk-päästöjä, pienhiukkaspäästöjä sekä haitallisia rikki-, ja typpipäästöjä. Meriteitse kulkeva rahti on kuitenkin kestävin rahtimuoto g CO₂/t km -indeksin vertailulla. Hiilitehokkaan rahdin kuljettamisen edellytyksenä on mahdollisimman suuret laivakoot.

Laivaliikenne on lähtenyt verrattain muita liikennemuotoja myöhemmin luomaan vähäpäästöisempää liikennöintiä asetusten ja päästövähennyssovimusten kautta. Kuitenkin viime vuosina on luotu maailmanlaajuisesti direktiivejä sekä pitkän aikavälin tavoitteita laivaliikenteen päästöjen pienentämiseksi. Vuonna 2018 IMO julkisti kaksivaiheisen strategian kasvihuonekaasujen pienentämiseksi pitkällä aikavälillä. Lisäksi on luotu vaihteittain tiukkenevia määräyksiä rikki- sekä typenoksidipäästöjen pienentämiseksi.

Vaihtoehtoisista polttoaineista nesteytettyä maakaasua käyttää laivakannasta pieni mutta huomattava osa. Nesteytetyn maakaasun infrastruktuuri on muista vaihtoehtoisista polttoaineista pisimmälle edennyttä. LNG:n käytöstä aiheutuu huomattavasti pienemmät rikki- sekä typenoksidipäästöt, jotka ovat ihmiselle ja ympäristölle haitallisia. Kasvihuonekaasujen vähentämisen kannalta LNG ei ole pitkällä aikavälillä tehokkaampi ratkaisu kuin perinteiset polttoaineet. Uusiutuvista vaihtoehdoista biometanoli sekä biokaasu ovat potentiaalisia tapoja vähentää hiilidioksidipäästöjä matalien elinkaaripäästöjen ansiosta. Biopolttoaineiden valmistusinfrastruktuuri tulee olemaan pitkään riittämättömä laivaliikenteen vaatimaan käyttöön. Kuitenkin esimerkiksi nesteytetyn maakaasun jakeluinfrastruktuuria voidaan hyödyntää tulevaisuudessa biokaasunjakelussa. Pitkällä aikavälillä päästään polttoaineissa hiilineutraalimpaan suuntaan polttokenno- ja akkuteknologian sekä biopolttoaineiden kehittyessä.

Laivojen energiatehokkuutta tutkittiin laaja-alaisesti ja todettiin monella osa-alueella olevan monia teknologioita sen parantamiseksi. Useita potentiaalisia ratkaisuja tunnistettiin rungon sekä propulsiolaitteiden tehokkuuden parantamiseksi. Suurta osaa energiate-

hokkuutta parantavista teknologioista voidaan ottaa käyttöön myös jo liikennöivillä aluksilla. Tehokkaita lyhyen aikavälin keinoja päästöjen vähentämiseen olisi juuri energiatehokkuuden parantaminen monella saralla sekä matkanopeuden hidastaminen.

Hidasnopeuksisten ja keskinopeiden dieselmoottoareiden odotetaan pysyvän suosituimpana voimanlähteinä varsinkin mannerten välisen rahdin kuljettamisessa korkean hyötysuhteensa ja lämpötehokkuutensa ansiosta. Vähärikkisten polttoaineiden sekä pakokaasujen jälkikäsittelymenetelmillä saadaan perinteisten nestemäisten polttoaineiden ympäristövaikutuksia pienennettyä. Yhtä ja selkeää vaihtoehtoa kestävämmän merenkulun tavoittamiseksi lyhyellä aikavälillä ei ole. Hiilineutraalimpaan merenkulkuun päästään toivottavasti tulevina vuosikymmeninä siihen ajavien teknologioiden kehittyessä kustannustehokkaiksi ratkaisuiksi.

Lähteet

- 1 Future Ship Powering Options. 2013. Verkkoaineisto Exploring alternative methods of ship propulsion: London. <<https://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options>>. Luettu 28.9.2020.
- 2 United Nations Conference on Trade and Development. 2020. Verkkoaineisto. Review of Maritime Transport 2020: New York. <https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf>. Luettu 3.11.2020.
- 3 Babicz, Jan. 2015. Wärtsilä Encyclopedia of Ship Technology. Verkkoaineisto. Wärtsilä: Helsinki. wartsila-o-marine-encyclopedia.pdf. Luettu 3.11.2020.
- 4 Griffiths D. 2006. Marine Low Speed Diesel Engines. London: IMarEST Publications.
- 5 International Council on Clean Transportation. 2017. Verkkoaineisto. Greenhouse Gas Emissions from Global Shipping, 2013-2015. Washington DC. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf>. Luettu 21.10.2020.
- 6 Elvers, Barbara. 2008. Handbook of Fuels: Energy Sources for transportation. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- 7 IMO 2020 – A Breath of Fresh Air. 2020. <<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/Sulphur%202020%20infographic%20%20page.pdf>> Verkkoaineisto. Luettu 26.11.2020.
- 8 Kämäräinen, Jorma & Jalkanen, Jukka Pekka. 2016. Alusten rikkipäästöt kääntyneet huimaan laskuun Itämerellä. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/236462540>>. Verkkoaineisto. Luettu 25.11.2020
- 9 Griffiths D. 2007. Marine Medium Speed Diesel Engines. London: IMarEST Publications
- 10 World Shipping Council. 2020. Verkkoaineisto. <<https://www.worldshipping.org/industry-issues/environment/air-emissions/carbon-emissions>>. Luettu 14.10.2020.
- 11 IMO. 2019. Verkkoaineisto. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation13. <[https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)>. Luettu 19.11.2020.
- 12 DNV GL. 2015. Verkkoaineisto. Upcoming environmental regulations for emissions to air – IMO NOx Tier III. <<https://www.dnvgl.com/news/upcoming-environmental-regulations-for-emissions-to-air-imo-nox-tier-iii-45479>>. Luettu 2.12.2020.
- 13 Torstein B. 2016. Verkkojulkaisu. Scenario- and Optimization- Based Control of Marine Electric Power Systems.
- 14 LVM. 2013. Verkkoaineisto. Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä, liite 2. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/77976/Julkaisu_ja_15-2013.pdf?sequence=1>. Luettu 4.11.2020.

- 15 Ecofys. 2015. Verkkoaineisto. Study on energy efficiency technologies for ships. <http://publications.europa.eu/resource/ellar/302ae48e-f984-45c3-a1c0-7c82efb92661.0001.01/DOC_1>. Luettu 21.10.2020.
- 16 Psarafatis, Harilaos. 2019. Verkkoaineisto. Sustainable Shipping, a Cross-Disciplinary View. Springer.
- 17 Azcueta, Rodrigo & Ker, Jason. 320m Cruise Ship: Bow Optimisation. Verkkoaineisto. Capehorn Engineering. <<https://www.cape-horn-eng.com/320m-cruise-ship-bow-optimization/>>. Luettu 8.10.2020.
- 18 Yksikköpäästöt. Verkkoaineisto. Lipasto VTT. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/info_vesi.htm>. Luettu 18.11.2020

