

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
School of Energy Systems
Energiatekniikka
BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

**KAUPALLISEN LAIVALIIKENTEEN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖJEN
VÄHENTÄMINEN RIKINPESUJÄRJESTELMIEN AVULLA**
Reducing carbon dioxide emissions from commercial shipping with sulphur scrubbers

Työn tarkastaja: Esa Vakkilainen
Työn ohjaaja: Esa Vakkilainen
Lappeenrannassa 25.7.2022
Jenna Nurmi

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
School of Energy Systems
Energiatekniikka

Jenna Nurmi

Kaupallisen laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentäminen rikinpesujärjestelmien avulla

Kandidaatintyö 2022

Ohjaajat: Professori Esa Vakkilainen
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikka

36 sivua, 5 kuvaa, 2 taulukkoa

Hakusanat: hiilidioksidin talteenotto, kaupallinen laivaliikenne, rikkipesuri

Tässä kandidaatintyössä käsitellään tapoja meriliikenteestä syntyvien hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi ja samalla arvioidaan niiden hyviä sekä huonoja puolia. Työssä tutkitaan myös hiilidioksidin puhdistamista laivojen pakokaasusta rikinpesujärjestelmän avulla. Rikinpesujärjestelmien alkuperäinen tarkoitus on nimensäkin mukaan poistaa laivan pakokaasusta rikin oksideja. Rikkipesurit ovat viime vuosina yleistyneet runsaasti rikkipäästöihin liittyneiden säädösten myötä. Hiilidioksidia pyritään vähentämään rikinpoistojärjestelmällä lisäämällä laitteiston prosessiveteen normaalia enemmän emäksenä käytettyä lipeää (NaOH), joka tällöin reagoi hiilidioksidin kanssa.

Työn tarkoituksena on tutustua kaupallisen laivaliikenteen hiilidioksidipäästöihin sekä asioihin, jotka siihen vaikuttavat. Tämän myötä esitellään myös erilaisia meriliikenteen hiilidioksidin vähennysvaihtoehtoja. Tarkempaa pohdintaa kohdistetaan kohdeyrityksen tutkiman option kannattavuuteen alustavalla tasolla. Option kannattavuuden arvioinnilla saadaan suuntaa lisätutkimusten kannattavuudesta sekä mahdollisesti tulevaisuudessa option kaupallistamisen hyvistä puolista. Työssä on kirjallisuuskatsauksen lisäksi tutkimusosa, jossa esitellään kokeellisesta tutkimuksesta saadut tulokset. Tutkimus on toteutettu kohdeyrityksen omalla rikinpesujärjestelmällä, joka on asennettu sisaryhtiön rahtilaivaan.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology
School of Energy Systems
Energy Technology

Jenna Nurmi

Reduction of CO₂ emissions from shipping by sulfur scrubbers

Bachelor's thesis 2022

Examiners: Professor Esa Vakkilainen
LUT School of Energy Systems
Energy Technology

36 pages, 5 figures, 2 tables

Keywords: carbon dioxide reduction, commercial shipping, sulphur scrubber

This Bachelor's thesis deals with the reduction of carbon dioxide emissions in commercial maritime transport. This thesis presents the pros and cons of different carbon dioxide reduction options. Special attention is paid to the option where carbon dioxide emissions are reduced with desulphurization systems. As the name suggests, the original purpose of desulphurization systems is to remove sulfur oxides from a ship's exhaust gas. The goal is to reduce carbon dioxide with the desulphurization system by adding more than the normal amount of sodium hydroxide (NaOH) to the process water, which then reacts with the carbon dioxide.

The purpose of the thesis is to learn about the carbon dioxide emissions caused by commercial shipping and everything that affects it. At first, this thesis presents different ways to reduce carbon dioxide in maritime transport. The profitability of the option studied by the target company of the thesis is focused on more specifically at a preliminary level. In addition to the literature review, the thesis has a research part where the results obtained from the experimental study are presented. The research was implemented with the target company's own desulphurization system, which is installed on the sister company's cargo ship.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	5
1.1	Työn tavoite ja tutkimuskysymykset.....	6
1.2	Työn rakenne ja rajaus	6
2	KAUPALLINEN MERILIIKENNE	8
2.1	Kaupallisen meriliikenteen CO ₂ -päästöt	8
2.2	Kaupparenkulun CO ₂ -päästöjen kehitys ja tulevaisuus.....	10
2.3	Meriliikenteen päästövähennyksiä ohjaavat tekijät.....	11
2.3.1	Säätely- ja institutionaaliset paineet	11
2.3.2	Markkinatekijät sekä resurssien saatavuus.....	12
2.3.3	Sosiaaliset paineet sekä ekologinen tietoisuus	12
3	TAPOJA CO ₂ -PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISEKSI	14
3.1	Teknologiset ratkaisut	14
3.1.1	Polttoaine- sekä energiajärjestelmien hallinta	14
3.1.2	Laivojen suunnitteluun liittyvät toimenpiteet.....	18
3.2	Operatiiviset toimenpiteet	18
3.2.1	Nopeuden säätely sekä reittisuunnittelu	19
3.3	Markkinaperusteiset toimenpiteet	19
4	RIKINPESUJÄRJESTELMÄ	21
4.1	Rikkidirektiivi	21
4.2	Suljetun kierron rikinpesujärjestelmä.....	21
4.3	Kemialliset reaktiot	23
5	TUTKIMUS	25
5.1	Tulosten esittely	25
5.2	Tulosten Analysointi	27
5.3	Tutkittu optio käytännössä	28
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
	LÄHTEET.....	32

1 JOHDANTO

Maapallomme globalisoituminen sekä kiihtyvästi kasvava maailmankauppa ovat tehneet laivaliikenteen roolista maailmantaloudelle erityisen tärkeän viimeisten vuosikymmenten aikana. Meriliikenne on nykypäivänä hallitseva tavaroiden kuljetusmuoto, joka kattaa maailman rahtiliikenteestä yli 80 %. (UNCTAD 2019) Tämän osuuden on ennustettu kasvavan kiihtyvää tahtia tulevina vuosikymmeninä (IMO 2020), mikä onkin herättänyt laajalti keskustelua meriliikenteen aiheuttamasta ympäristökuormasta. Erityisesti laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen vaikutus ilmastoon on ollut kasvava tutkimusten sekä keskustelun aihe viime vuosikymmeninä. Kuitenkin meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on vasta lähtökuopissaan lainsäädännön sekä teknologisten ratkaisujen käyttöönoton osalta. (Sierra & Fancello 2020)

Kansainvälisesti kasvava tietoisuus ympäristömme tilasta sekä ilmastonmuutoksesta ovat kohdistaneet meriliikennettäkin kohtaan oman osansa kritiikistä, mikä on pakottanut sen aloittamaan muutoksen kohti kestävämpää tulevaisuutta. Hiilidioksidin lisäksi laivaliikenteen synnyttämistä päästöistä merkittävimpiä ovat rikki- sekä typpipäästöt, jotka ovat ilmaston saastuttamisen lisäksi myös ihmisten terveydelle todistettavasti haitallisia (Chen et al. 2007). Rikkipäästöjen säätelemiseksi kansainvälinen merenkulkualan järjestö eli IMO (International Maritime Organization) kehitti rikkidirektiivin, jonka viimeisimmät rajoitukset astuivat voimaan vuonna 2020. Rikkidirektiivin myötä meriliikenteen toimijat päätyivät tilanteeseen, jossa täytyi valita sopivin rikinpoistoratkaisu uusien rajoitteiden saavuttamiseksi. Yksi näistä vaihtoehtoista oli laivoihin asennettavat rikinpesujärjestelmät, joita tämän työn kohdeyrityskin markkinoille tuottaa.

Rikkidirektiivin astuessa voimaan rikinpesujärjestelmät avasivat monille meriliikenteen toimijoille mahdollisuuden jatkaa joustavasti haluamansa polttoaineen käyttöä ja näin rikinpesujärjestelmien suosio onkin kasvanut nopeasti viime vuosina. Kasvava kysyntä hiilidioksidipäästöjen kontrolloimista kohtaan on herättänyt kysymyksen siitä voisiko rikinpesujärjestelmiä hyödyntää myös hiilidioksidin puhdistamiseen laivojen pakokaasusta.

1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tässä työssä käsitellään kaupallisen meriliikenteen merkitystä maailmantaloudelle ja sitä kautta tutustutaan meriliikenteen synnyttämiin hiilidioksidipäästöihin. Työssä verrataan meriliikenteen synnyttämien hiilidioksidipäästöjen osuutta maapallon antropogeenisiin hiilidioksidipäästöihin, minkä lisäksi työssä käsitellään meriliikenteen sekä sen hiilidioksidipäästöjen kehittymistä tulevaisuudessa. Tämän jälkeen esitellään laivaliikenteen päästövähennystavoitteiden pääajurit. Perehdyttyämme meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen vaikutuksiin sekä tulevaisuuteen, siirrytään työssä tutkimaan tapoja laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen kontrolloimiseksi aiempien tutkimusten sekä kirjallisuuden pohjalta. Lopussa tutustutaan kohdeyrityksen toimeksiantona saatuun option, jossa hiilidioksidipäästöjä pyritään vähentämään rikinpesujärjestelmän avulla. Työn tavoitteiden saavuttamiseksi on muotoiltu seuraavat tutkimuskysymykset:

- Millä tavoin laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää?
- Mitä haasteita tai mahdollisuuksia tutkittavaan kohdeoptioon liittyy?
- Onko työn kohdeoptiota syytä jatkotutkia?

1.2 Työn rakenne ja rajaus

Työ on jaettu kahteen osuuteen, joista ensimmäinen on kirjallisuuskatsaus ja toinen soveltava yritysosuus. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on luoda työlle teoreettinen tausta, jossa perehdytään kaupallisen meriliikenteen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin sekä vaihtoehtoihin niiden kontrolloimiseksi. Teoriaosuudessa pohditaan myös, mitkä asiat meriliikenteen päästöjen vähentämiseen vaikuttavat. Kirjallisuuskatsauksessa esitellään hiilidioksidipäästövähennysvaihtoehtojen hyödyt sekä haitat ja perehdytään siihen, mitkä asiat optimaalisimman päästövähennysvaihtoehdon valintaan vaikuttavat.

Soveltava yritysosuus on toteutettu toimeksiantona suomalaiselle yritykselle, joka päätoimialanaan valmistaa laivoihin rikinpesujärjestelmiä. Yritysosuudessa käydään läpi kohdeyrityksen suljetun kierron rikinpesujärjestelmän toiminta ja tutkitaan sen soveltuvuutta hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä. Soveltavassa osuudessa esitellään kokeellisella tutkimuksella saadut tulokset ja osittain näiden pohjalta arvioidaan tutkittavan option

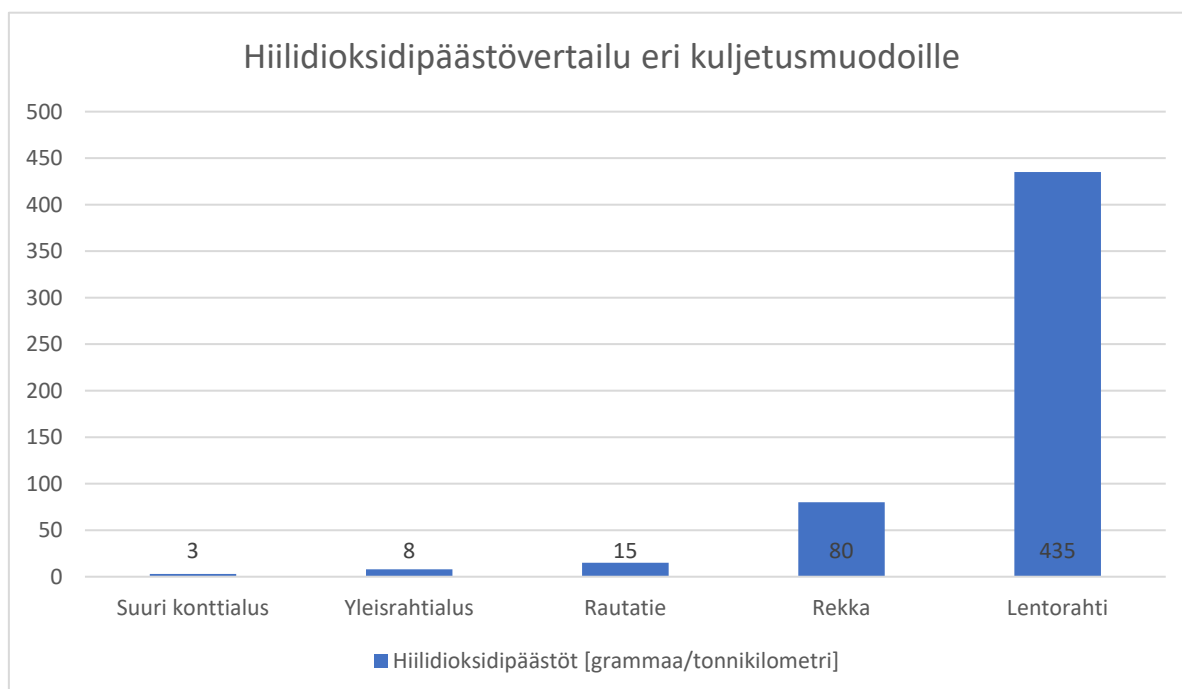
kannattavuutta. Soveltavan osuuden tarkoituksena on tarjota yritykselle alustava katsaus option sekä jatkotutkimusten kannattavuudesta.

2 KAUPALLINEN MERILIIKENNE

Kauppamerenkulku on kansainvälisen talouden selkäranka, sillä se kattaa yli neljä viidesosaa maailmankaupalle tarpeellisten tuotteiden sekä hyödykkeiden kuljetuksesta (UNCTAD 2019). Meriliikenteen suosio on selitettävissä sen kyvystä kuljettaa suuria määriä tavaroita kulutettua energiamäärää kohti. Tästä johtuen meriliikenne on ylivoimaisesti kustannustehokkain rahtimuoto, mikä selittääkin sen käytön suosion myös lyhyemmillä etäisyyksillä. Merikuljetuksilla, sisävesikuljetukset mukaan lukien, on keskeinen rooli kansainvälinen kaupan volyymin ylläpitämisessä. (Lee et al. 2016)

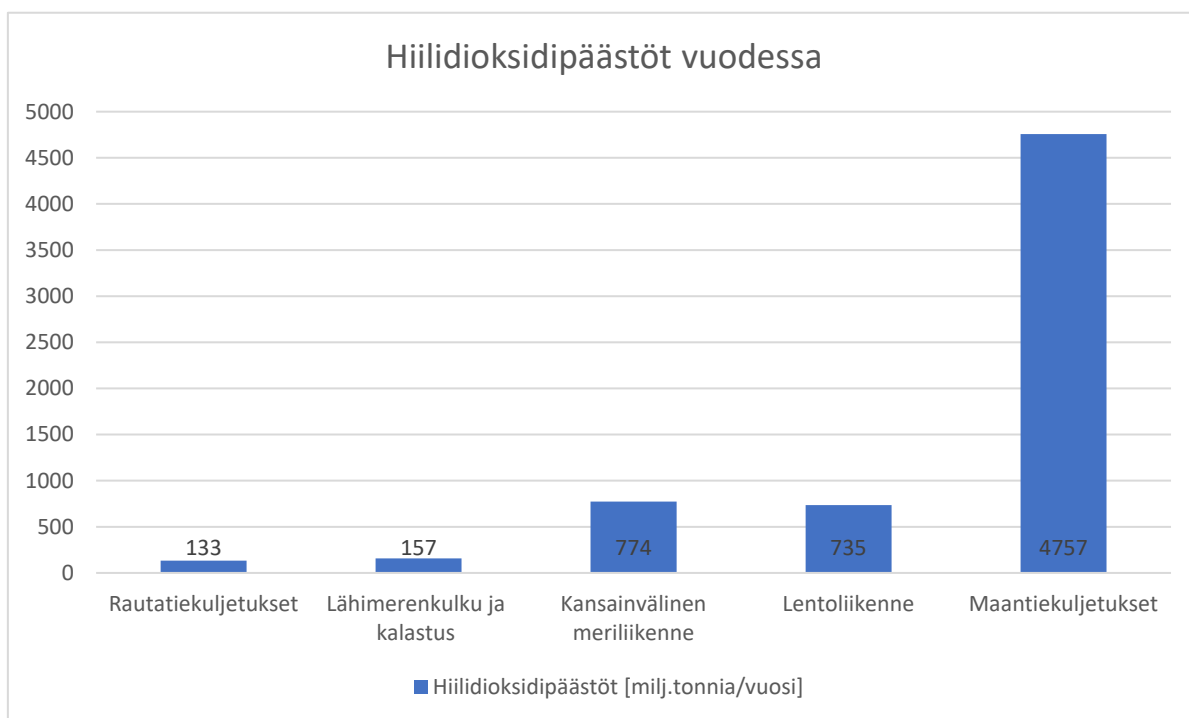
2.1 Kaupallisen meriliikenteen CO₂-päästöt

Kustannustehokkuutensa lisäksi laivaliikenne tunnetaan myös ympäristöystävällisimpänä rahtimuotona, mikä tarkoittaa alhaisia hiilidioksidipäästöjä verrattaessa muihin rahtimuotoihin (Sierra & Fancello 2020). Kuvaajassa (2.1) esitettynä hiilidioksidipäästövertailu eri rahtimuodoille.



Kuva 2.1 Hiilidioksidipäästö vertailu kuljetussuoritteiden mukaan. (Muokattu lähteestä: IMO 2009)

Tonnikilometri tarkoittaa kuljetustyön määrää, joka saadaan kuljetetun tavaramäärän ja kuljetusmatkan tulona. Kuvaajasta voidaan huomata, että suurten konttialusten synnyttämät hiilidioksidipäästöt ovat häviävän pienet esimerkiksi lentorahdin aiheuttamiin päästöihin verrattuna valittua suoriteyksikköä kohti. Myös rekan synnyttämiin päästöihin verrattuna suuri konttialus tuottaa hiilidioksidipäästöjä vain noin 3,8 %. Meriliikenteen suuri rooli maailmantalouden rattaissa on tehnyt siitä kuitenkin yhden isoimmista kansainvälisen talouden päästösektoreista (Gibbs et al. 2014). Kuvaajassa (2.2) on kuvattuna kokonaishiilidioksidipäästöt vuonna 2008.



Kuva 2.2 Kokonaishiilidioksidipäästöt vuonna 2008. (Muokattu kohteesta: IMO 2009)

Vuoden 2008 kuvaajasta nähdään, miten meriliikenteen aiheuttamat vuotuiset hiilidioksidipäästöt kipuavat tarkastelussa toiseksi, joskin vielä jääden reippaasti maantiekuljetusten taakse. Vuoden 2008 päästömääristä saadaan hyvin osviittaa laivaliikenteen merkityksestä kansainväliselle taloudelle. Vaikka meriliikenne on ylivoimaisesti vähähiilisin ratkaisu maailmankaupan rahtivolyymien ylläpitämiseen, on sen vuosittaiset kokonaishiilidioksidipäästöt sekä niiden kasvava osuus herättäneet eri tahoissa huolta viime vuosikymmeninä (Sierra & Fancello 2020).

2.2 Kaupparenkulun CO₂-päästöjen kehitys ja tulevaisuus

Kansainvälistä meriliikennettä pidetään yhtenä suurimpana kaupallisen talouden aiheuttamista sektoreista, ja sen on myös arvioitu tulevan yhdeksi nopeimmin kasvavista kasvihuonepäästösektoreista tulevaisuudessa (Gibbs et al. 2014). Vuoden 2020 heinäkuussa kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO julkaisi neljännen sekä viimeisimmän päästötutkimuksensa liittyen globaaliin laivaliikenteeseen. Tässä tutkimuksessa käsitellään kansainvälisen laivaliikenteen synnyttämien kasvihuonekaasupäästöjen kehitystä vuodesta 2012 vuoteen 2018 asti sekä uusia arvioita tulevaisuuden laivaliikenteen päästömääristä. Taulukko (2.1) kuvaa maailman laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen kehitystä vuosien 2012 sekä 2018 välillä verrattuna maailman antropogeenisiin hiilidioksidipäästöihin.

Taulukko 2.1 Laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen kehitys suhteessa globaaleihin antropogeenisiin hiilidioksidipäästöihin vuosina 2012–2018. (Muokattu lähteestä: IMO 2020)

Vuosi	Gloaalit antropogeeniset hiilidioksidipäästöt [milj.tonnia]	Laivaliikenteen hiilidioksidipäästöt [milj.tonnia]	Laivaliikenteen osuus [%]
2012	34 793	962	2,76 %
2013	34 959	957	2,74 %
2014	35 225	964	2,74 %
2015	35 239	991	2,81 %
2016	35 380	1 026	2,90 %
2017	35 810	1 064	2,97 %
2018	35 573	1 056	2,89 %

Taulukosta voidaan huomata, miten laivaliikenteestä aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen osuus on kasvanut vuosittain. Tämän lisäksi vuosittaiset antropogeeniset hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet tasaiseen tahtiin, mikä antaa viitteitä myös maailmantalouden kasvusta. IMO arvioi neljännessä tutkimuksessaan meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen kattavan jopa 15 % kaikista maapallomme hiilidioksidipäästöistä vuoteen 2050 mennessä. Erityisesti syvänmeren segmentin, eli mantereiden välisen laivaliikenteen, kysynnän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi. Sen ennustetaan kattavan jopa 80 % tulevaisuuden kaupallisesta

meriliikenteestä, mikä tekeekin siitä merkittävän sektorin päästövähennystavoitteiden toteutumiseksi (DNV GL 2019).

2.3 Meriliikenteen päästövähennyksiä ohjaavat tekijät

Ilmastonmuutoksen jatkuvasti nostaessaan päätään on myös meriliikenne pakotettu muuttumaan ympäristölle ystävällisempään suuntaan. Vaikka syyt muutokseen ovat moninaiset, voidaan laivaliikenteen pääajureina kohti muutosta pitää kolmea eri tekijää:

1. Sääntely- ja institutionaaliset paineet
2. Markkinatekijät sekä resurssien saatavuus
3. Sosiaaliset paineet sekä ekologinen tietoisuus ja reagointikyky

2.3.1 Sääntely- ja institutionaaliset paineet

Saavuttaakseen kansainvälisellä tasolla sovitut tavoitteen ilmastonmuutoksen pysäyttämiseksi, on meriliikenteen vähennettävä erityisesti hiilidioksidipäästöjään. Tätä varten on laivaliikenteen toimijoiden tehtävä perusteellisia muutoksia päästöpolullaan. (Anderson & Bows 2012) Vaikka meriliikenteen päästöjä ei ole vielä virallisesti sisällytetty yhteenkään kansainväliseen ilmastosopimukseen, on sen säätelemiseen olemassa oma hallintaelimensä. IMO (International Maritime Organization) on yhdistyneiden kansakuntien erityisjärjestö, joka vastaa merenkulun turvallisuudesta ja alusten aiheuttaman meren sekä ilman saastumisen ehkäisemisestä. IMO:n tarkoituksena on tukea YK:n kestävän kehityksen tavoitteita. IMO itse määrittelee sen päätavoitteena olevan luoda merenkulualalle oikeudenmukainen ja tehokas, yleisesti hyväksytty sekä sovellettava, sääntelykehys. IMO on perinteisesti säädellyt merenkulun vaikutusta ympäristöön ottamalla käyttöön erilaisia säädöksiä sekä lakeja, ja se onkin Yhdistyneiden kansakuntien ilmastokonferenssin toimesta nimitetty meriliikenteen hallinnoimisesta vastaavaksi elimeksi (Sierra & Fancello 2020). IMO asetti voimaan vuonna 1983 MARPOL-yleissopimuksen, jonka tarkoituksena on minimoida sekä ehkäistä alusten aiheuttamaa ympäristön saastumista niin laivojen tavallisella toiminnalla kuin myös tapaturmatilanteissa.

Vuoden 2018 huhtikuussa IMO julkaisi alustavan strategiansa meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi tavoitteenaan kohdata Pariisin ilmastosopimuksen asettamien rajoitusten kanssa. Lopullista suunnitelmaa laivaliikenteen päästöpolun

ohjaamiseksi odotetaan julkistettavan vasta vuonna 2023, mutta jo alustavalla strategialla IMO ehdottaa ohjeellista viitekehystä lyhyellä (2018–2023), keskipitkällä (2023–2030) sekä pitkällä aikavälillä (vuodesta 2030 eteenpäin). Strategiassa on esitetty tavoitteena olevan vähentää vuosittaisia laivaliikenteestä syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä jopa 50 prosentilla vuoteen 2050 mennessä vuoden 2008 tasosta. Vähennys pyritään toteuttamaan asteittain strategian asettamien välietappien mukaisesti, mikä viittaa siihen, että IMO tulee tiukentamaan päästövaatimuksia tulevana vuosina. (IMO 2018)

2.3.2 Markkinatekijät sekä resurssien saatavuus

Markkinoiden ohjaavaa vaikutusta voidaan pitää merenkulun innovaatioiden lähteenä. Erityisesti raakaöljyn hinnasta riippuvat polttoaineiden hintojen ajoittaiset muutokset kannustavat laivaliikenteen toimijoita kartoittamaan vaihtoehtoisia energiaratkaisuja tai toimintatapoja kulutuksen minimoimiseksi. Polttoaineen taloudellinen rooli tulee ilmeiseksi, kun otetaan huomioon energiakustannusten kattavan keskimäärin jopa 50–70 prosenttia laivojen käyttökustannuksista (Rehmatulla & Smith, 110). Tämän osuuden on joidenkin arvioiden mukaan odotettu kasvavan entisestään raskaan polttoöljyn kustannusten noustessa, mikä tekee vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönoton houkuttelevaksi. (Sierra & Fancello 2020)

Laivaliikenteen toimivarmuuteen vaikuttaa merkittävästi polttoaineen saatavuus ja siihen liittyvät epävarmuustekijät (Sierra & Fancello 2020). Olemassa olevia öljyvarantojen riittoisuutta on vaikea arvioida ja tästä syystä useat saatavilla olevat arviot ovat usein kiistanalaisia. Myös poliittinen epävarmuus useilla öljyvarantoalueilla herättää huolta polttoaineresurssien saatavuudesta, mistä johtuen monet näkevätkin vaihtoehtoisten energiaratkaisujen kartoittamisen kannattavana. Energiaratkaisujen monipuolistamista voidaankin pitää merenkulun toiminnan avaimena tulevaisuudessa. (DNV GL 2019)

2.3.3 Sosiaaliset paineet sekä ekologinen tietoisuus

Ympäristö- sekä ilmastouutiset ovat nykyään valokeilassa päivittäin. Ympäristön tila sekä ilmastomuutoksen eteneminen ovat kestoaiheita puheenaiheina niin päättäjien kuin ihan tavallistenkin ihmisten keskuudessa. Eri organisaatiot luovatkin jatkuvasti painetta toimia

ekologisemmin sekä kestävämmiin, mikä vaikuttaa omalta osin myös merenkulkualan. Asiakkaiden sekä sijoittajien vaatimukset voivat olla hyvin voimakkaita tekijöitä ympäristöystävällisempien toimintatapojen omaksumisessa (Linder 2018). Merenkulkualan toimijoiden suositellaankin vastaamaan asiakkaiden odotuksiin. Asiakasvaatimukseen vastaaminen voi tarkoittaa esimerkiksi kustannusten kilpailukykyisyyttä, päästöjen vähentämistä, polttoaineen tehokasta käyttöä sekä terveyden ja turvallisuuden vaalimista. (Lam 2015, 78)

Asiakkaiden asettamat paineet meriliikenteelle ovat pistäneet alueilleen vihreämmän imagon tavoittelemisen yritysten keskuudessa. Erityisesti tiukentuvia säädöksiä ennakoivat ekologiset muutokset yritystoiminnassa voidaan nähdä hyvinkin positiivisena liikkeellepanevana tekijänä, jolla yritysten on mahdollista erottua positiivisesti kilpailijoistaan. (Linder 2003, 234–245) Positiivisena nähdään myös yritysten saama tunnustus erilaisilta järjestöiltä sekä hallintaelimiltä (Fiorino 2006). Joskus ensimmäiset askeleet ekologisempaan suuntaan voivat vaikuttaa suoraan yrityksen ympäristö- sekä moraaliarvoihin, mikä edesauttaa jatkossakin ”vihreämpien” toimenpiteiden omaksumisessa (Sierra & Fancello 2020).

3 TAPOJA CO₂-PÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMISEKSI

Kestävyystavoitteiden saavuttaminen ei ole yksiselitteistä ja sen toteutuminen vaatii vähähiilisten teknologioiden sekä toimenpiteiden laajamittaista käyttöönottoa. Nykyisten sekä tulevien säädösten noudattamiseksi, merenkulkualalla tulee tapahtua perusteellisia muutoksia polttoaineiden käytön, teknologian sekä liiketoimintatapojen suhteen. Ympäristöjalanjäljen pienentämiseksi sekä kestävä kehityksen takaamiseksi on olemassa erilaisia vaihtoehtoja. (Linder 2018, 61)

3.1 Teknologiset ratkaisut

MARPOL-yleissopimusta voidaan pitää merkittävimpänä syynä tutkia hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen toimivia vaihtoehtoja laivoille (Sierra & Fancello 2020, 8). Teknisiä vaihtoehtoja on useita, mutta tärkeimpinä niistä voidaan pitää:

1. Polttoaineen muutokset sekä uudet energiaratkaisut
2. Laivan suunnittelussa tehtävät toimenpiteet

3.1.1 Polttoaine- sekä energijärjestelmien hallinta

Laivaliikenteestä syntyvät päästöt ovat vahvasti kytköksissä käytettävän polttoaineen kanssa. Jopa 95 % maailman laivaliikenteestä on raportoitu kulkevan raskaalla polttoöljyllä (HFO), jota kutsutaan myös nimellä bunkkeriöljy. (Cullinane 2014, 1–5) Tämä laivaliikenteessä yleisesti käytössä oleva bunkkeriöljy on edullisuutensa lisäksi myös huomattavasti tieliikenteessä käytettyä epäpuhtaampaa ja täten sen käyttö synnyttää suuren määrän päästöjä saatavaa tehoa kohden. Bunkkeriöljyn käytöstä syntyviin päästöihin ei olla saatu merkittävää vähennystä edes uudempien moottoreiden avulla. Täten sen aiheuttamiin haasteisiin on vastattu erilaisilla vaihtoehtoisilla polttoaineratkaisuilla. (Sierra & Fancello 2020, 8) IMO:n asettamien rikin vähennystavoitteiden saavuttamiseksi viime vuosina suositaan on kasvattanut erityisesti vähärikkinen polttoöljy. Vähärikkinen polttoöljy ei kuitenkaan alenna merkittävästi pakokaasuissa esiintyvän hiilidioksidin määrää ja siksi sen käytön vaikutuksia ei ole syytä tarkastella enempää tässä työssä. (Rystad Energy 2019)

Nesteytetty maakaasu eli LNG (Liquefied Natural Gas) on viime vuosina voimakkaasti suosiotaan kasvattanut polttoaine, jota ei kuitenkaan voida hyödyntää polttoöljyä käyttävissä laivoissa. LNG:n käyttö laivojen polttoaineena nähdään kuitenkin hyvin potentiaalisena vaihtoehtona päästöjen pienentämiselle. Perinteisiin laivoissa käytettäviin polttoaineisiin verrattuna nesteytetyllä maakaasulla voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä parhaimmillaan jopa 30 prosenttia. (Winnes et al. 2015, 73–82; Brynolf et al. 2014, 6–18) Nesteytetyn maakaasun käyttö on kaupallisesti houkutteleva vaihtoehto johtuen sen hyvästä saatavuudesta. Kasvavaan kysyntään pystytään arvioiden mukaan vastaamaan hyvin myös tulevina vuosikymmeninä. (Sierra & Fancello 2020, 10)

LNG:n laajamittaiseen käyttöönottoon on tutkittu kuitenkin liittyvän erilaisia haasteita. Näitä ovat esimerkiksi varastointiin liittyvät ongelmat sekä kansainväliset standardit. Näitä haasteita ei kuitenkaan pidetä yhtä suurina verrattuna monien muiden polttoaineratkaisujen kanssa. (Wang & Notteboom 2014, 749–774) Maailman suuret maakaasuvarat sekä jo valmiiksi toimivat toimitusketjut tukevat myös vahvasti LNG:n laajaa käyttöönottoa. Käytännössä nesteytetyn maakaasun nähdään skaalautuvan erityisen hyvin syvänmeren laivoille, jotka kulkevat pitkiä matkoja. LNG:n kysynnän onkin arvioitu kasvava runsaasti vuoteen 2030 mennessä: alle miljoonasta tonnista jopa 30 miljoonaan tonniin. Tähän on pyritty vastaamaan laajamittaisilla investoinneilla esimerkiksi satamissa Euroopassa. (Baresic et al. 2018)

Vastapainona toiveikkaille näkemyksille LNG:n tulevaisuudesta perinteisten polttoaineiden korvaajana, on eri tahojen osalta esitetty myös skeptisiä näkemyksiä sen todellisesta kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskyvystä. Useammat tutkimukset arvioivat, ettei LNG:n laajamittaisella käytöllä pystytä tavoittamaan IMO:n asettamia CO₂-päästövähennystavoitteita vuoteen 2050 mennessä (Rehmatulla 2016). Elinkaariarvioinnin mukaan LNG:n vaikutus ympäristöön voi olla jopa samaa luokkaa nykyisin käytetyn raskaan polttoöljyn kanssa (Brynolf et al. 2014, 74). Tästä johtuen nesteytetyn maakaasun käytön tulevaisuus nähdään parhaimmillaan ristiriitaisena ja sen kehitystä on haastava arvioida (Sierra & Fancello 2020, 10).

Uusiutuvilla energiamuodoilla kuten tuuli- ja aurinkoenergialla on havaittu olevan mahdollista potentiaalia hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen täydentämällä jo olemassa olevia sähköntuotantojärjestelmiä laivoissa. Aurinkoenergian käytöllä on potentiaalia vähentää hiilidioksidipäästöjä jopa 12 %, kun taas yhdistetyllä tuuli- sekä aurinkovoiman käytöllä voidaan hiilidioksidipäästöjä vähentää parhaimmillaan jopa 40 %. (Bouman et al. 2017)

Huolimatta tästä mahdollisesta potentiaalista, ei yhdistettyä tuuli- sekä aurinkovoiman käyttöä nähdä ainakaan toistaiseksi ratkaisuna kaupallisen merenkulun päästövähennyksiin. Tähän ovat syynä kalliit alkuinvestoinnit sekä tilan puute uusia järjestelmiä varten. (IEA Bioenergy 2017)

Tuulivoimaa hyödynnetään kuitenkin jossakin määrin myös rahtialuksissa purjerakennelmien sekä suurien leijojen avulla, joiden tarkoituksena on valjastaa tuulivoima laivaa liikuttavaksi energiaksi. Erityisesti avomerellä, missä tuulet ovat voimakkaita, purjeilla sekä leijoilla voidaan säästää merkittävästi polttoainetta samalla säilyttäen täysi nopeus, kun laivaa liikutetaan osittain tuulivoimalla (Hirdaris & Cheng 2012, 11–14). Yksinkertaisten tuulivoimarakennelmien käytöllä on usein erittäin alhaiset asennuskustannukset, mutta parhaimmillaan niillä voidaan säästää huomattavia määriä polttoainetta pitkillä etäisyyksillä, mikä vähentää myös syntyviä päästöjä. Purjeet sekä tuulileijat ovat olleetkin kasvava trendi modernissa meriliikenteessä. (Sierra & Fancello 2020, 9)

Sähköisten järjestelmien kehittäminen laivoissa on herättänyt kiinnostusta maailmanlaajuisesti, sillä niiden avulla pystytään optimoimaan laivojen energianhallintaa sekä vähentämään päästöjä etenkin satama-alueilla (Dallas 2019, 1; Dai et al. 2019, 223–225). Sähköisiä järjestelmiä pystytään hyödyntämään esimerkiksi energian tuottamisessa tai akkujen lataamisessa esimerkiksi täyssähkö- sekä hybridilaivoille. Sähköjärjestelmät täyssähköisissä laivoissa perustuu akkuihin, jotka pystytään lataamaan maaverkosta laiturissa ollessa. Hybridilaivoilla sen sijaan pystytään käyttämään esimerkiksi akkuja energiatehokkuuden parantamiseksi. Täyssähköisten järjestelmien sekä akkujen käytön välillä voidaan toteuttaa useita hybridisaatioasteita perinteisten järjestelmien energiatehokkuuden parantamiseksi. Tästä johtuen sähköjärjestelmien käytössä nähdään olevan suuri potentiaali energiatehokkuuden parantamiseksi sekä päästöjen vähentämiseksi. (Zis 2019, 82–95; Schwartz et al. 2020)

Vuonna 2019 raportoitiin yli 320 hybridialusta joko toiminnassa tai tilauksessa ja miltein kaikkien uudislaivojen on ennustettu hyödyntävän akkuteknologiaa lähitulevaisuudessa (DNV GL 2019). Kuitenkin sähkökäyttöisten laivojen kustannustehokkuus riippuu tulevina vuosina suurelta osin akkukustannuksista sekä tekniikan kehityksestä (Schmidt et al. 2017, 1–8). Kuten useimpien vaihtoehtoisten energialähteiden osalta, kustannustehokkuuteen vaikuttavat myös merkittävästi teknisten sekä sähköisten vaihtoehtojen kaupallinen soveltuvuus eri laivasegmenteille. Erityisesti lyhyitä matkoja kulkevat laivat ovat lupaavassa asemassa täyssähköisten- sekä hybridijärjestelmien käyttöönoton suhteen. Syvänmeren segmentille

puolestaan on ennustettu sopivan paremmin erilaiset energianhallintajärjestelmät, jotta sähköistäminen pysyy vielä kustannustehokkaana verrattuna perinteisiin menetelmiin. On myös huomioitava, että sähköjärjestelmien potentiaaliin kasvihuonekaasujen vähentämisessä vaikuttaa suuresti sähkön tuotannon lähde. (Sierra & Fancello 2020, 9) DNV GL esimerkiksi arvioi, että tuulivoimalla tullaan tuottamaan vuoteen 2050 mennessä jopa 30 prosenttia koko maailman sähköstä, kun vuonna 2020 taso oli vasta 5 prosentin luokkaa (DNV GL 2019).

Polttokennot voivat tuottaa tehokkaasti sähköä hyödyntämällä vedyn tai jonkun muun polttoaineen kemiallista energiaa. Polttokennot ovat tehokkaampia kuin perinteiset mäntämoottorit, koska ne pystyvät muuntamaan polttoainetta sähköksi jopa 60 prosentin hyötysuhteella, kun taas perinteiset moottorit yltyvät vain noin 40 prosenttiin (Mahapatra & Singh 2014, 511–520; Sadek & Elgohary 2020). Vaikka vety nähdään parhaillaan lupaavimpana polttoaineratkaisuna polttokennoille, asettaa sen käyttö merkittäviä tuotanto-, kuljetus-, varastointi- sekä turvallisuushaasteita (Saito 2018). EMSA:n (European Maritime Safety Agency) raportissa on todettu, että polttokennoteknologia on toistaiseksi alkutekijöissä liiketoiminnan saralla maailmanlaajuisessa mittakaavassa ja useita haasteita on ratkaistava ennen kuin siitä voidaan saada realistinen vaihtoehtona tulevaisuuden energiaratkaisuille (DNV GL EMSA Study 2016).

Biopolttoaineiden, kuten biodieselin sekä nesteytetyn biokaasun, käytön tulevaisuus jakaa mielipiteitä. Biopolttoaineet ovat nopeasti biohajoavia, mikä on fossiilisia polttoaineita ympäristöystävällisempää. Tämän lisäksi biopolttoaineiden käyttö antaa paljon joustavuutta, sillä niitä voidaan yhdistetyksi käyttää tavanomaisten polttoaineiden kanssa. (Sierra & Fancello 2020, 10) Valitettavana haittapuolena biopolttoaineilla on kuitenkin se, ettei niiden tarvittavaa tuotantomäärää olla pystytty varmistamaan maailmanlaajuisista kysyntää vastaavaksi (IEA 2017). Tämän lisäksi on olemassa myös eriäviä mielipiteitä siitä, että voiko biopolttoaineilla merkittävästi vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, kun otetaan huomioon koko niiden tuotantokaari. Biopolttoaineiden valmistus vaatii paljon viljelymaata, joka tuhoaa metsiä ja kulutta vettä sekä köyhdyttää maaperää. Suuressa mittakaavassa biopolttoaineita ei siis kaikkien mielestä nähdä ainakaan hiilineutraalina vaihtoehtona. (Balcombe et al. 2019, 72–88)

3.1.2 Laivojen suunnitteluun liittyvät toimenpiteet

Laivojen suunnittelu on keskeisessä roolissa, kun halutaan parantaa energiatehokkuutta sekä sitä kautta vähentää päästöjä. Laivan suunnittelussa merkittäviä tekijöitä energiatehokkuuden kannalta ovat esimerkiksi rungon muodon optimointi, päällysrakenteiden soveltuvuus sekä propulsiojärjestelmien kehittäminen. (Sierra & Fancello 2020, 11) Propulsiolla tarkoitetaan työntövoiman tuottamiseen käytettävää mekaniikkaa. Joidenkin arvioiden mukaan pelkästään rungon muodon sekä oikeanlaisten päällysrakenteiden optimoinnilla voidaan vähentää huomattavasti polttoaineen kulutusta sekä sitä kautta hiilidioksidipäästöjä jopa 15 prosenttia erityisesti suuremmilla aluksilla. Optimistisimmat arviot kertovat hiilidioksidipäästöjen parhaimmillaan jopa puolittuvan onnistuneella suunnittelulla sekä toteutuksella. (IMO 2020) Parhaan tuloksen saavuttamiseksi on laivan kuitenkin toimittava suunniteltujen teknisten tietojen mukaisesti sekä kuljettava suhteellisen hitaalla nopeudella (Winnes et al. 2015, 73).

IMO:n uudislaivoille kehittämä suunnitteluindeksi eli EEDI (Energy Efficiency Design Index) astui voimaan vuonna 2013. Suunnitteluindeksissä määritetään vähimmäisenergiatehokkuustaso uudislaivoille, joiden bruttovetoisuus on vähintään 400. Ensimmäiset vaatimustasot astuivat voimaan vuonna 2015. Vaadittuja tasoja kiristetään joka viides vuosi, jolloin uudistetut rajoitukset astuivat voimaan vuonna 2020. Määritetty energiatehokkuuden vähimmäisvaatimustaso riippuu asennetusta moottorin tehosta sekä odotetusta tehosta suunnittelunopeudella. Vähimmäisvaatimustaso määritetään merikokeilla, joissa vallitsevat olosuhdevaatimukset ovat keränneet osaltaan kritiikkiä. Joidenkin mielipiteiden mukaan nykyiset merikoemenettelyt eivät vastaa todellisia merenkäynnin olosuhteita, jolloin haluttuja vähennyksiä ei välttämättä käytännössä tavoiteta. (Lindstad et al. 2019) EEDI:n kehittäminen laivojen energiatehokkuuden parantamisen varmistamiseksi onkin IMO:n yksi tärkeimmistä kiinnepisteistä (Sierra & Fancello 2020, 12).

3.2 Operatiiviset toimenpiteet

Operatiivisilla toimenpiteillä tarkoitetaan usein reittisuunnittelua sekä polttoaineen käytön säätelyä. Niin sanotulla ”slow steaming”-tekniikalla laivojen nopeutta tarkoituksellisesti vähennetään polttoaineen kulutuksen sekä päästöjen minimoimiseksi. Erilaisista polttoaineen kulutuksen säätelytavoista operatiiviset toimenpiteet ovat helpoimpia toteuttaa, koska ne eivät

vaadi suuria investointeja. Laivan kulkureitin sekä nopeuden säätelemisellä optimaaliseksi voidaan saavuttaa merkittäviä tuloksia lyhyessäkin ajassa. (Zis & Psaraftis 2019, 117–119)

3.2.1 Nopeuden säätely sekä reittisuunnittelu

Nopeutta pienentämällä pystytään vähentämään merkittävästi hiilidioksidipäästöjä, vaikka siitä ei ole aina hyötyä käyttökustannusten vähentämisessä. Tämä riippuu kullekin laivalle ominaisesta suunnittelunopeudesta. (Kim et al. 2014) Suunnittelunopeudella tarkoitetaan laivan mahdollista käyttönopeutta, joka määräytyy laivan suunnitellun sekä fyysisten ominaisuuksien keskinäisen korrelaation perusteella. Kulkunopeus tulee siis sovittaa laivan ominaisuuksiin sopivaksi optimaalista suunnittelunopeutta sekä strategista matkanopeusaluetta noudattaen. Hidastamalla laivojen kulkunopeutta pystytään myös vähentämään laivaliikenteen keskuudessa vallitsevaa ylikapasiteettia. Toisaalta kulkunopeuksien hidastaminen voi johtaa etenkin lyhyillä etäisyyksillä maarahtin suosimiseen, mikä puolestaan lisää kasvihuonekaasupäästöjä. (Woo & Moon 2014)

Moderni teknologia mahdollistaa nykypäivänä sään sekä meriolosuhteiden ennustamisen erinomaisella tarkkuudella, mikä auttaa energiatehokkaimman navigointireitin valinnassa. Reitin optimointi onkin erittäin tehokasta niin kustannusten kuin myös päästöjen vähentämisen kannalta. Kulkureitin optimoinnin tärkeys korostuu etenkin pitkillä matkoilla, mikä tekee siitä merkittävän kehityskohteen erityisesti syvänmerensegmentin laivoille. (Styhre & Winnes 2013)

3.3 Markkinaperusteiset toimenpiteet

Markkinaperusteiset toimenpiteet ovat nykypäivänä suuressa osassa meriliikenteen päästötavoitteiden ohjaamisessa toivottuun suuntaan (Psaraftis 2016). Yleisesti markkinapohjaisten toimenpiteiden voidaan ajatella jakautuvan kahteen pääkategoriaan, jotka soveltuvat tämän työn aiheeseen seuraavalla tavalla:

1. Estämällä sekä rajoittamalla korkeahiilisten polttoaineiden käyttöä
2. Kannustamalla sekä rohkaisemalla vähähiilisten toimenpiteiden käyttöönottoa

Molemmat lähestymistavat perustuvat ei toivotun vaihtoehdon tekemisestä epäedullisempaa käyttäjille. Markkinapohjaisina rajoitusmekanismeina voidaan pitää esimerkiksi erilaisia verotus sekä maksupakotteita korkeahiilisten vaihtoehtojen käyttäjille. Negatiivisella vahvistamisella pystytään tehokkaasti ohjaamaan toimijoita toivottuun suuntaan, mutta samaan aikaan on olemassa myös riski siitä, että laivaliikenteen sijaan aletaan suosimaan muita hiilidioksidipäästöjä lisääviä liikennemuotoja. (Balcombe et al. 2019, 72–88) Tämän lisäksi verotuksen osalta haasteellista ovat alueelliset erot. Verotus on joissakin tapauksissa helppoa kiertää hakemalla esimerkiksi polttoainetta laivaan maista, joissa verotuksella asetetut pakotteet eivät päde (Nikolakaki 2013). Kilpailun vääristymisen välttämiseksi olisikin tärkeää soveltaa pakotteita enemmän maailmanlaajuisella tasolla kuin alueittain, mutta tämä vaatii jo isompia toimenpiteitä (Moffat 2010, 104).

Päästöjen määrän kontrolloimiseksi on olemassa erilaisia päästökauppajärjestelmiä, joiden tarkoituksena on myöntää yrityksille yksilöllisesti sallittu hiilidioksidipäästöraja. Mikäli asetettu päästökatto ylittyy tietyn aikarajan puitteissa, voidaan yrityksiä tästä verottaa tai toisaalta rajan alittamisella on yritystä palkitseva vaikutus. Rajan asettaminen on haastavaa, sillä liian tiukasti asetettu päästöraja voi merkitä yrityksille liian suuria lisäkustannuksia ja toisaalta liian löyhä raja saattaa heikentää päästökauppajärjestelmän kykyä vähentää päästöjä. Päästökauppajärjestelmien vaikutukset voidaan jakaa pitkän sekä lyhyen aikavälin vaikutuksiin. Pitkällä tähtäimellä tehokas päästökauppajärjestelmä voi johdattaa yritykset investoimaan uusiin teknologisiin innovaatioihin vähentääkseen hiilidioksidipäästöjään. Lyhyellä aikavälillä voidaan kannustaa varustamoita merkittävästi esimerkiksi alentamaan laivojen kulkunopeutta, mikä säästää energiaa sekä vähentää päästöjä. (Gu et al. 2019, 318–325)

Kannustinmekanismeja ovat esimerkiksi suotuisat verojärjestelmät, alhaiset korot ympäristöhankkeisiin sijoitetuissa lainoissa sekä erilaisten tukien jakaminen. Monet satamat ovat myös kantaneet kortensa kekoon päästöjen vähentämiseksi tarjoamalla erilaisia rahallisia etuuksia laivoille, jotka täyttävät tietyt ympäristökriteerit. (Papaefthimiou & Sitzimis 2017, 81)

4 RIKINPESUJÄRJESTELMÄ

4.1 Rikkidirektiivi

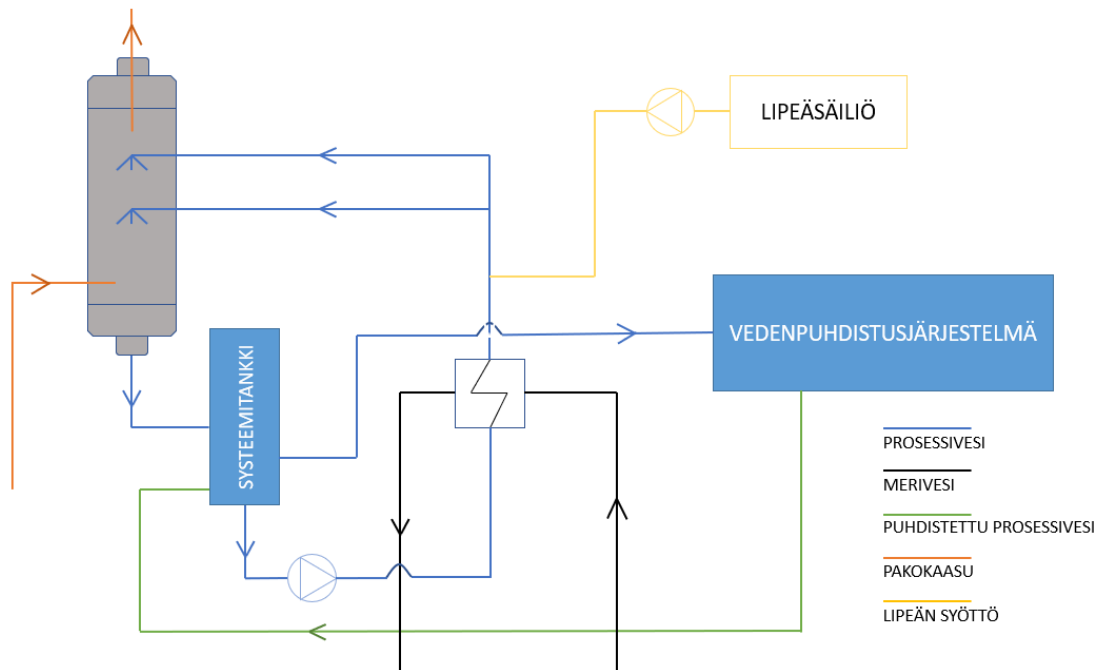
Hiilidioksidin lisäksi meriliikenteen tiedetään aiheuttavan myös muita ympäristölle sekä ihmisille haitallisia päästöjä. Näistä merkittävimpiä ovat rikin oksidit (SO_x) sekä typen oksidit (NO_x), jotka edistävät ilmakehään päästessään happosateiden muodostumista ja ovat todistettavasti ihmisten terveydelle erityisesti hengitysilmaan päästessään haitallisia. Näiden lisäksi maininnan arvoisina päästöinä pidetään olevan hiilimonoksidi (CO), erilaiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet sekä pienhiukkaset. Laivaliikenteen rikkipäästöjen hallinnoimista varten IMO hyväksyi vuonna 2016 uuden rikkidirektiivin, joka rajoittaisi laivoissa käytettävän polttoaineen sallitun rikkipitoisuuden enintään 0,5 prosenttiin aiemman 3,5 prosentin sijaan. (Sierra & Fancello 2020, 13)

Uusi rikkidirektiivi astui voimaan vuoden 2020 tammikuussa. Tästä eteenpäin kaikkien liikennöivien laivojen oli siis rajoitettava syntyvien päästöjen rikkipitoisuus vaadittuun 0,5 prosenttiin. Tällä rajoituksella pyritään turvaamaan ihmisten hengitysilman puhtaus erityisesti rannikkoalueilla. Uusien rajoitteiden saavuttamiseksi varustamoiden tärkeimpinä vaihtoehtoina voidaan pitää olevan:

- Polttoaineen vaihtaminen vähärikkisempään, mutta kalliimpaan polttoaineeseen
- Investoida laivoihin, joissa voidaan hyödyntää moderneja polttoaineita
- Investoida rikinpoistojärjestelmään.

4.2 Suljetun kierron rikinpesujärjestelmä

Uuden rikkidirektiivin voimaan astumisen myötä rikinpesujärjestelmien suosio on kasvanut viime vuosikymmenenä ja niitä myös tämän työn kohdeyritys markkinoille tuottaa. Rikinpoistojärjestelmien suosio johtuu niiden kustannustehokkuudesta, sillä niiden avulla voidaan aluksella jatkaa halvemman polttoaineen käyttöä. Kohdeyritys tarjoaa markkinoille avoimen kierron ja suljetun kierron järjestelmiä sekä hybridijärjestelmiä, joissa yhdistyy avoin sekä suljettu kierto. Tälle työlle oleellisin on suljetun kierron järjestelmä.



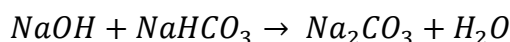
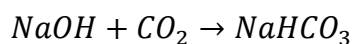
Kuva 4.1 Suljetun kierron järjestelmä.

Suljetun kierron järjestelmässä prosessivettä kierrätetään takaisin pesutornille vedenpuhdistusjärjestelmän kautta. Puhdistukseen käytettävä vesi johdetaan pesutorniin yläsuuttimista, jotka ruiskuttavat veden tasaisesti koko torniin. Tornin alaosassa sijaitsevat alasuuttimet, joista pumpatun veden tarkoituksena on jäähdyttää alhaalta torniin tulevaa pakokaasua. Jäähdytynyt pakokaasu kohoaa tornissa ylöspäin kohdaten haponkestävästä teräsilpusta muodostuvan pedin, joka hidastaa kaasun virtausta. Pakokaasussa esiintyvät rikin oksidit reagoivat yläsuuttimilta ruiskutettavan veden kanssa, jolloin pakokaasu puhdistuu rikistä tehokkaasti. Likainen vesi valuu tornin pohjalle ja kostea pakokaasu kohoaa ylös pisaraerottimeen, jossa loppukin kosteus saadaan talteen ennen pakokaasun johtamista ulos. Likainen vesi johdetaan systeemitankkiin, josta se jatkaa matkaansa vedenpuhdistusjärjestelmään, jonka avulla likaisesta vedestä erotellaan pois kiinteä kuona. Puhdistettu vesi kierrätetään takaisin systeemitankkiin, josta se jatkaa matkaansa lämmönvaihtimen kautta takaisin pesutornille. Prosessivettä jäähdytetään kylmän meriveden avulla, sillä veden liiallinen lämpeneminen heikentää pesutornissa tapahtuvaa reaktiota pakokaasun kanssa. Tämän lisäksi prosessiveteen syötetään nestemäistä lipeää (NaOH) neutraloimaan veteen liuenneita happamia rikkiyhdisteitä. Prosessiveden pH mitataan pesutornia ennen sekä jälkeen, minkä mukaan automatiikka osaa

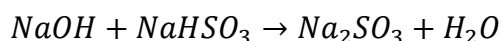
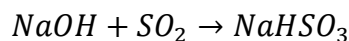
säätää lipeän syötön oikealle tasolle. Tässä työssä ollaan kiinnostuneita prosessiveteen syötettävästä lipeästä ja sen vaikutuksesta pakokaasussa esiintyvään hiilidioksidiin. Kohdeyritys tutkii mahdollisuutta puhdistaa rikin lisäksi myös hiilidioksidia pesutornille saapuvasta pakokaasusta.

4.3 Kemialliset reaktiot

Laivan pakokaasussa esiintyvän hiilidioksidin puhdistaminen lipeän avulla perustuu pesutornissa tapahtuviin kemiallisiin reaktioihin. Tälle työlle oleellimmat reaktiot tapahtuvat lipeän (NaOH) reagoiessa hiilidioksidin (CO₂) sekä rikin (SO₂) kanssa. Hiilidioksidin reagoiessa lipeän kanssa tapahtuu seuraava reaktioketju:



Ketjun ensimmäisessä osassa lopputuotteena saadaan natriumvetykarbonaattia (NaHCO₃), joka tunnetaan myös nimellä ruokasooda. Natriumvetykarbonaatti on tunnetusti valkoista, hyvin veteen liukunevaa pulveria. Natriumvetykarbonaatti jatkaa reagoimistaan edelleen lipeän kanssa, jolloin reaktioketjun lopputuotteena saadaan Natriumkarbonaattia (Na₂CO₃) sekä vettä. Natriumkarbonaatti tunnetaan myös nimellä sooda ja sillä on useita eri käyttökohteita myös teollisuuden sovellutuksissa. Sooda on halpa bulkkikemikaali, jota hyödynnetään muun muassa selluteollisuuden tarpeisiin. Se on myös helposti veteen liukuneva emäs, joka nostaa tällöin myös prosessiveden pH-arvoa. Hiilidioksidin lisäksi myös rikki reagoi lipeän kanssa, jolloin tarkasteltava reaktioketju on:



Rikin reagoiessa lipeän kanssa syntyy Natriumvetysulfiittia (NaHSO₃), jota hyödynnetään muun muassa juomaveden puhdistuksessa ylimääräisestä kloorista sekä selluprosessissa erityisesti paperimassan valkaisemisessa. Natriumvetysulfiitti jatkaa reagoimista edelleen lipeän kanssa, josta lopputuotteena saadaan Natriumsulfiittia (Na₂SO₃) sekä vettä. Natriumsulfiitti on epästabiili yhdiste, joka jatkaa reagoimista pakokaasussa esiintyvän hapen

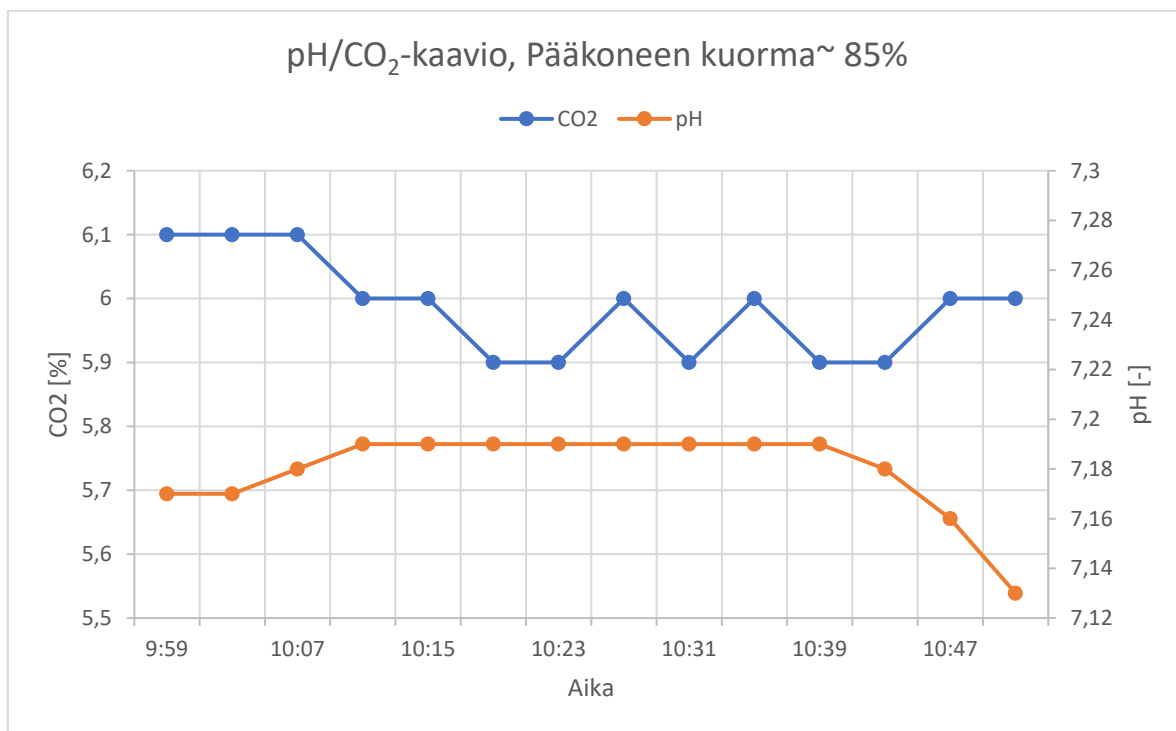
kanssa ja tällöin lopputuotteena saadaan yhdistettä Na_2SO_4 . Nämä reaktioketjut selittävät meille yksinkertaistetusti, mitä rikkipesurin sisällä oikein tapahtuu.

5 TUTKIMUS

Kokeellinen tutkimus kohdeyritykselle suoritettiin tämän sisaryhtiön rahtialuksella hyödyntämällä alukseen asennettua kohdeyrityksen omaa hybridijärjestelmää. Kokeiden datan keruuseen on käytetty rikinpesujärjestelmän keräämiä mittaustuloksia. Datan käsittelyssä on otettu huomioon jo ennalta tiedossa ollut järjestelmän antama virheellinen pH-arvo prosessivedelle.

5.1 Tulosten esittely

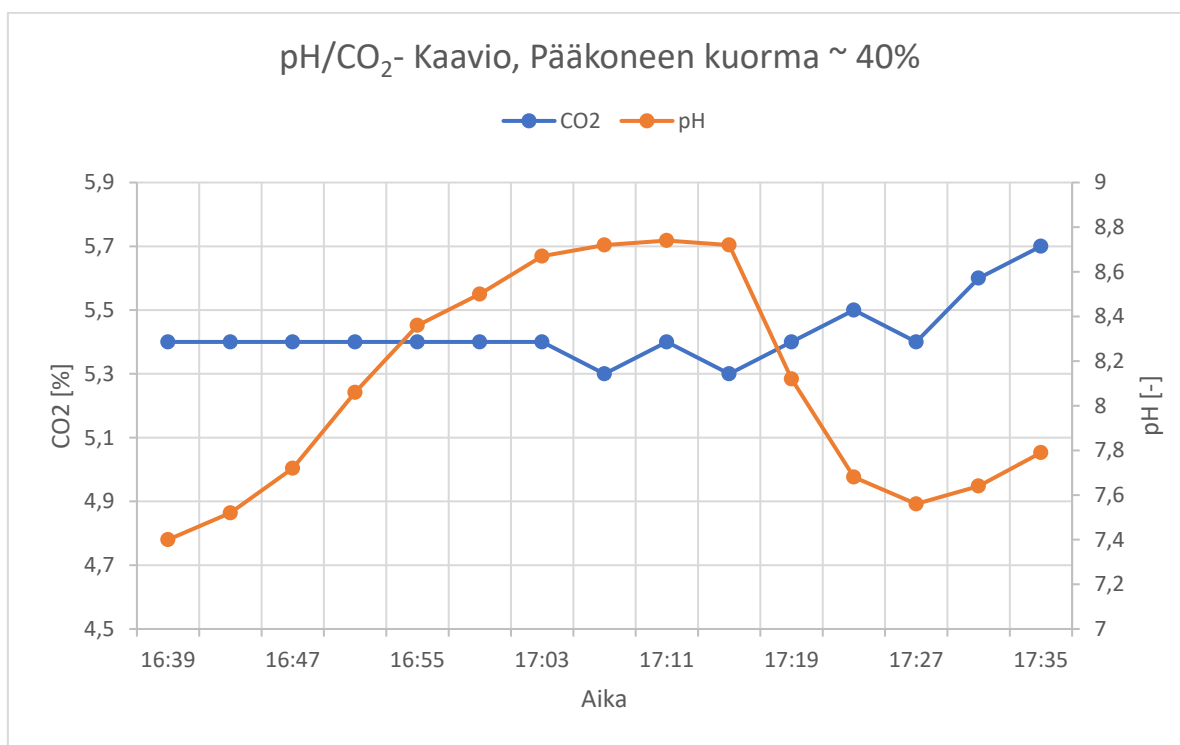
Tutkimusta varten suoritettiin kaksi koetta, joista ensimmäinen tehtiin laivan pääkoneen kuorman ollessa 85 %. Järjestelmää ajettiin suljetulla kierrolla molempien kokeiden ajan. Vesinäytteitä analysoitiin ottamalla järjestelmän poistovedestä vesinäyte säännöllisin väliajoin pH-arvon tarkastamista varten. Vesinäytteiden perusteella pystyttiin todistamaan järjestelmän pH-anturin kalibroinnin olleen viialla. Tästä johtuen dataa on käsitelty todellisuutta vastaavaksi nostamalla järjestelmän pH-arvoja kahden yksikön verran ylöspäin. Kuvaajassa (5.1) on kuvattuna ensimmäisen kokeen tulokset rikinpoistojärjestelmän syöttöveden pH-arvolle sekä pakokaasun CO₂-pitoisuudelle.



Kuva 5.1 1. kokeen mittaustulokset.

Ensimmäisen kokeen alkutilanteessa pakokaasun hiilidioksidipitoisuus oli 6,1 prosenttia ja pH-arvo syöttövedelle oli noin 7,2. Lipeäpumpun syöttökuorma alkutilanteessa oli yli 90 prosenttia. Pian kokeen aloittamisen jälkeen lipeän syöttö nostettiin kuitenkin täyteen kapasiteettiin. Vaikutukset hiilidioksidipitoisuuteen alkoivat näkymään pian arvojen putoamisena. Lipeän syöttö pidettiin maksimissa koko mittausten ajan, jolloin hiilidioksidipitoisuus saatiin putoamaan parhaimmillaan 5,9 prosenttiin. Syöttöveden pH-arvossa ei kuitenkaan ollut havaittavissa merkittävän suurta muutosta. Ensimmäinen koe päätettiin noin tunnin kuluttua aloitushetkestä.

Toisen kokeen aikana pääkoneen kuorma oli 40 %, mikä tarkoittaa käytännössä hitaampaa kulkunopeutta. Mittauksen alkuhetkellä pakokaasun CO₂-arvo oli 5,4 prosenttia ja prosessiveden pH-arvo oli puolestaan 7,4. Kuvaajassa (5.2) on esitettyä toisesta kokeesta saadut mittaustulokset.



Kuva 5.2 2. kokeen mittaustulokset.

Toisen kokeen alussa lipeäpumpun syöttö nostettiin suoraan 100 prosenttiin. Kokeen aikana prosessiveden pH-pitoisuuden havaittiin kasvavan huomattavasti. Pakokaasun hiilidioksidipitoisuudessa ei kuitenkaan tapahtunut merkittävää muutosta lipeäpumpun

käydessä täysillä. Kokeen loppupuolella lipeän syöttö puolitettiin, mistä seurasi prosessiveden pH-arvon äkillinen lasku. Syöttöveden pH-arvon putoaminen vaikutti melkein välittömästi pakokaasun hiilidioksidipitoisuuteen, joka kasvoi parhaimmillaan 5,7 prosenttiin. Myös toinen koe päätettiin noin tunnin kulutta aloituksesta.

5.2 Tulosten Analysointi

Tutkimuksissa kerätyn tiedon perusteella voidaan määrittää suurin saavutettu hiilidioksidipäästövähennys pakokaasussa. Hiilidioksidipitoisuuden minimi sekä maksimi arvoista määritetään hiilidioksidipitoisuuden prosentuaalinen muutos kummallekin kokeelle. Kokeista saadut tulokset esitettynä taulukossa (5.1).

Taulukko 5.1 Mittaustulokset ja pakokaasun CO₂-pitoisuuden lasku.

	Pääkoneen kuorma [%]	CO₂ max. [%]	CO₂ min. [%]	CO₂ vähenee [%]
1. Koe	85	6,1	5,9	3,3
2. Koe	40	5,7	5,3	7

Kokeiden perusteella pakokaasussa esiintyvää hiilidioksidipitoisuutta saadaan pudotettua ensimmäisessä kokeessa 3,3 prosenttia. Ensimmäisessä kokeessa saavutettu pienempi hiilidioksidivähennys on perusteltavissa korkealla pääkoneenkuormalla, jolloin syntyy myös enemmän pakokaasua puhdistettavaksi. Kohdelaivaan asennetun lipeäpumpun virtaama täydellä teholla on noin 90 l/h. Normaalisti pääkoneen käydessä täydellä kuormalla, käy pumppu yli 90 prosentin kapasiteetilla prosessiveden emästasapainon ylläpitämiseksi. Tästä johtuen nostaessa lipeän syötön 100 prosenttiin, ei litramääräinen virtaama tunnissa kasva merkittävästi. Tämä vaikuttaa myös prosessiveden pH-arvoon, joka pysyy koko ensimmäisen kokeen ajan melkein muuttumattomana. Olosuhteet huomioiden saavutettu 3,3 prosentin hiilidioksidipitoisuuden pudotus onkin positiivisella tavalla yllättävä ottaessa huomioon olosuhteet.

Toisessa kokeessa saavutetaan jopa 7 prosentin muutos pakokaasun hiilidioksidipitoisuudessa, mikä on ensimmäistä koetta huomattavasti suurempi. Toisessa kokeessa pääkoneen kuorma oli ensimmäistä koetta pienempi, jolloin myös pesutornille virtaaman pakokaasun määrä on

alhaisempi. Lipeän syötön muuttaminen täydelle teholle ei aluksi näyttänyt vaikuttavan pakokaasussa esiintyvään hiilidioksidiin mitenkään. Hiilidioksidipitoisuus laski hieman vasta prosessiveden pH:n noustessa arvoon 8,7. Kuitenkin kun lipeänsyöttö puolitettiin, alkoi hiilidioksidin määrä pakokaasussa kasvamaan. Lipeän syötön ollessa siis täysillä, noin 90 l/h, kontrolloi se tällöin hiilidioksidipitoisuuden kohoamista. Vasta kun lipeänsyöttö puolittui, voitiin havaita sen vaikutus pakokaasun hiilidioksidiin.

5.3 Tutkittu optio käytännössä

Kokeellisella tutkimuksella saadut tulokset antavat lupaavan kuvan tutkittavasta optiosta. On kuitenkin hyvä ottaa huomioon mahdolliset käytännön haasteet. Rikinpesujärjestelmän alkuperäinen tarkoitus on puhdistaa pakokaasusta pelkästään rikkiä, mistä johtuen lipeän syöttö on määritetty ideaalille tasolle vaaditun emästasapainon säilyttämiseksi. Lähtökohtaisesti rikinpoistojärjestelmiä käytettäessä pyritään välttämään CO₂-absorbaatiota, sillä se lisää lipeän kulutusta. Rikin puhdistuksessa käytetty pH-taso on noin 6, jolloin hiilidioksidia ei reagoi prosessiveden kanssa juuri ollenkaan.

Åbo Akademin professori Anders Brink arvioi hiilidioksidin puhdistamiseen vaaditun pH-tason olevan vähintään 8. Tällöin kemiallisten reaktioiden lopputuotteena saadaan enemmän natriumvetykarbonaattia (NaHCO₃), kun lipeää ei riitä reaktioketjun jatkamiseen. Tämä olisi kannattavaa kemikaalien kulutuksen kannalta, mutta hiilidioksidia ei tällöin välttämättä saada riittävästi talteen. Natriumvetykarbonaatti on yleisesti tunnettu, leivonnassakin käytetty valkoinen pulveri, joka on tutummalta nimeltään ruokasooda.

Anders Brink arvioi todella tehokkaan hiilidioksidin pesun toteutuvan prosessiveden pH-tason saavuttaessa arvon 10. Tällöin lipeää riittää jatkamaan reaktioketju loppuun ja lopputuotteeksi saadaan natriumkarbonaattia (Na₂CO₃) sekä vettä (H₂O). Tämä kuitenkin lisää merkittävästi lipeän kulutusta. Teoreettisella tarkastelulla lipeän kulutus kaksikertaistuu, mikäli oletetaan kaiken natriumvetykarbonaatin jatkavan reagoimista lipeän kanssa. Reaktioketjun lopputuotteena saatu natriumkarbonaatti on edullinen bulkkikemikaali, jota voidaan hyödyntää monessa prosessissa aina lasituotannosta selluprosesseihin. Mikäli hiilidioksidi saadaan onnistuneesti pakokaasusta talteen, voidaan loppukemikaalien sijoituksessa nähdä kaupallista potentiaalia.

Haasteeksi hiilidioksidin tehokkaassa puhdistuksessa voi muodostua siis lipeän kasvava kulutus, mikä lisää käyttökustannuksia sekä tilantarvetta. Runsaampi kulutus vaatisi siis laivalle isompia säiliöitä lipeän varastoimiseen tai toisena vaihtoehtona lipeäsäiliöiden tankkausvälit lyhenevät, mikä voi omalta osin vaikeuttaa laivojen liikennöintiä. Lipeän runsaampi kulutus vaikuttaisi tällöin myös satamiin vaatien lisää varastointitilaa.

Todellisuudessa hiilidioksidin pesutulokseen vaikuttaa useampia eri muuttujia, joita rikkipesurin sekä järjestelmän sisällä voi ilmetä jatkotutkimusten edetessä. Alustavassa tutkimuksessa tilanne rikkipesurin sisällä on hyvin yksinkertaistettu sekä vasta suuntaa antava ja monia asioita on otettava huomioon option kehittämiseksi. Erinäisiä muuttujia voivat olla esimerkiksi lämpötila, järjestelmään syntyvät saostumat sekä materiaalien kestävyys. Erityisesti reaktioista syntyvä kiintoaine voi olla haaste järjestelmän sujuvalle toiminnalle.

Sanomattakin on selvää, että hiilidioksidin onnistunut puhdistus pakokaasusta tarkoittaa hiilidioksidin keräämistä talteen eikä laskemista prosessiveden mukana vesistöihin. Avoimen kierron rikinpesujärjestelmissä prosessivesi lasketaan suoraan mereen puhdistuksen jälkeen, mikä hiilidioksidin kohdalla tarkoittaisi vain ongelma siirtämistä tulevaisuuteen. Hiilidioksidi liukenee yhdisteistä mereen ajan myötä ja lopputulema on tällöin sama kuin jos se olisi päästetty suoraan ilmakehään. Hiilidioksidin puhdistus vaatii siis toimiakseen suljetun kierron rikinpesujärjestelmän, joita toistaiseksi on asennettu laivoihin huomattavasti avoimen kierron järjestelmiä vähemmän. Kuitenkin rikkidirektiiviin odotetaan tulevan tiukempi linjaus jo lähitulevaisuudessa, mikä mahdollisesti estää prosessiveden laskemisen mereen jopa kokonaan.

Toisaalta ehdottoman suuri etu tälle optiolle on se, ettei hiilidioksidin puhdistamiseen tarvita omaa erillistä järjestelmäänsä. Alkuinvestoinnit jäisivät tällöin alhaisiksi eikä tilan puutteen suhteenkaan tarvitsi laivassa murehtia samaan tapaan kuin asentaessa täysin uutta järjestelmää. Mikäli rikinpesujärjestelmästä saadaan jatkettua myös hiilidioksidin puhdistukselle toimiva kokonaisuus, voi se pitää sisällään paljon kaupallista potentiaalia.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Maapallomme globalisoituminen sekä kiihtyvästi kasvava maailmankauppa ovat tehneet laivaliikenteen roolista maailmantaloudelle erityisen tärkeän viimeisten vuosikymmenten aikana. Meriliikenne on nykypäivänä hallitseva tavaroiden kuljetusmuoto, joka muodostaa maailman rahtiliikenteestä jopa 80 %. (UNCTAD 2019) Laivaliikenteen suuri osuus maailmantalouden volyymin ylläpitämisessä on tehnyt siitä myös yhden isoimmista kaupallisista kasvihuonekaasupäästösektoreista ja tämän osuuden on ennustettu kasvavan kiihtyvää tahtia myös tulevaisuudessa. (Sierra & Fancello 2020)

Tässä työssä paneuduttiin laivaliikenteen aiheuttamiin hiilidioksidipäästöihin ja selvitettiin, millä eri tavoilla niitä voidaan kontrolloida tulevaisuudessa. Tutustuimme myös alkeellisesti kohdeyrityksen tutkimaan optioon, jossa hiilidioksidipäästöjä laivan pakokaasusta puhdistetaan rikinpesujärjestelmän avulla ja pohdimme tämän vaihtoehdon mahdollisuuksia sekä haasteita. Työn tavoitteiden saavuttamiseksi muotoiltiin seuraavat tutkimuskysymykset:

- Millä tavoin laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää?
- Mitä haasteita tai mahdollisuuksia tutkittavaan kohdeoptioon liittyy?
- Onko työn kohdeoptiota syytä jatkotutkia?

Meriliikenteen aiheuttamaan ympäristökuormaan on alettu suhtautumaan kriittisesti viimeisten vuosikymmenten aikana, ja sen myötä myös hiilidioksidipäästöt ovat herättäneet huolta eri tahoissa ympäri maailmaa. Hiilidioksidipäästöjen kontrolloimiseksi on olemassa erilaisia tapoja aina teknologisista muutoksista operatiivisiin toimenpiteisiin. Teknologisia vaihtoehtoja löydettiin tässä työssä useita: Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö, energiajärjestelmien hallinta sekä suunnitteluun liittyvät toimenpiteet. Operatiivisilla toimilla puolestaan tarkoitetaan nopeuden hallintaa sekä reittisuunnittelua ottaen huomioon myös sääolosuhteet. Tämän lisäksi meriliikenteen päästöpolkua pystytään ohjailemaan markkinapohjaisesti erilaisilla kannustimilla tai verotusjärjestelmillä, joilla voidaan kannustaa meriliikenteen toimijoita valitsemaan toivottu sekä kestävämpi ratkaisu.

Perehdyimme alustavasti rikinpesujärjestelmän soveltuvuuteen puhdistaa pakokaasusta hiilidioksidia ja esitimme merikokeissa saadut tutkimustulokset. Kokeilla pystyttiin alkeellisesti osoittamaan, että lipeän syötön lisääminen rikinpesujärjestelmän syöttöveteen

vähentää rikkipesurissa mitattavaa pakokaasun hiilidioksidipitoisuutta. Näiden tietojen sekä henkilöhaastatteluiden pohjalta arvioitiin option kannattavuutta. Alustavien arvioiden pohjalta kohdeoptiota on järkevää jatkotutkia sekä kehittää, sillä potentiaalia sen kaupallistamiseen on. Tämä optio voi taten olla tulevaisuudessa yksi monista tavoista vähentää meriliikenteen hiilidioksidipäästöjä.

Lopputulema option toimivuuden kannalta oli lupaava, mutta jatkotutkimusten edetessä on syytä huomioida erilaisten muuttujien vaikutusta rikinpesujärjestelmän toimintaan hiilidioksidin pesussa. Tähän voi vaikuttaa esimerkiksi lämpötila tai saostumien syntyminen. Tämän lisäksi kemikaalien kulutuksen runsas lisääntyminen voi tuottaa omat haasteensa. Option ehdottomana vahvuutena on kuitenkin se, ettei hiilidioksidin puhdistamiseen tarvittaisi omaa erillistä järjestelmäänsä. Tämä poistaa kalliit alkuinvestoinnit, mikäli rikinpesujärjestelmä on entuudestaan jo asennettuna. Yhdistetyllä rikin- sekä hiilidioksidinpuhdistusjärjestelmällä voi olla kysyntää markkinoilla tulevaisuudessa.

LÄHTEET

UNCTAD—United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime *Transport; United Nations: New York, NY, USA, 2019.*

Lee, P.T.W.; Chung, Y.S.; Lam, J.S.L. Transportation research trends in environmental issues: A literature review of methodology and key subjects. *Int. J. Shipp. Transp. Logist.* 2016.

Gibbs, D.; Rigot-Muller, P.; Mangan, J.; Lalwani, C. The role of seaports in end-to-end maritime transport chain emissions. *Energy Policy* 2014.

IMO. Third IMO GHG Study; International Maritime Organization: London, UK, 2014.

DNV GL. MARITIME FORECAST TO 2050—Energy Transition Outlook 2019. Technical report. Saatavissa: [DNVGL.com](https://www.dnvgl.com)

Anderson, K.; Bows, A. Executing a Scharnow turn: Reconciling shipping emissions with international commitments on climate change. *Carbon Manag.* 2012

IMO. Adoption of the initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships and Existing IMO Activity Related to Reducing GHG Emissions in the Shipping Sector. *IMO Note.* 2018.

Rehmatulla, N.; Smith, T. Barriers to energy efficient and low carbon shipping. *Ocean Eng.* 2015. [Viitattu 15.4.2022]

DNV GL. LNG as Ship Fuel. Technical Report. 2016. Saatavilla: <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/index.html>

Lam, J.S.L. Designing a sustainable maritime supply chain: A hybrid QFD–ANP approach. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* 2015.

Linder, A. Explaining shipping company participation in voluntary vessel emission reduction programs. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2018. [Viitattu 18.4.2022]

Fiorino, D.J. *The New Environmental Regulation*; Mit Press: Cambridge, MA, USA, 2006.

Cullinane, K.; Bergqvist, R. Emission control areas and their impact on maritime transport. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2014, 1–5. [Viitattu 18.4.2022]

Rystad Energy. In Proceedings of the Singapore Annual Summit and Rystad Client User Meeting; Speech of Bjornar Tonhaugen—head of oil market research, Singapore, 8 October 2019.

Winnes, H.; Styhre, L.; Fridell, E. Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Res. Transp. Bus. Manag.* 2015, 17, 73–82. [Viitattu 20.4.2022]

Brynolf, S.; Magnusson, M.; Fridell, E.; Andersson, K. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2014, 6–18. [Viitattu 20.4.2022]

Wang, S.; Notteboom, T. The adoption of liquefied natural gas as a ship fuel: A systematic review of perspectives and challenges. *Transp. Rev.* 2014, 34, 749–774.

Baresic, D.; Smith, T.; Raucci, K.; Rehmatulla, C.; Narula, N.; Rojon, I. LNG as a Marine Fuel in the EU: Market, Bunkering Infrastructure Investments and Risks in the Context of GHG Reductions; *UMAS*: London, UK, 2018.

Rehmatulla, N. Future trends in green shipping. Working paper. 2016. Saatavissa: [\(PDF\) Future Trends in Green Shipping \(researchgate.net\)](#)

Brynolf, S.; Fridell, E.; Andersson, K. Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *J. Clean. Prod.* 2014, 74. [Viitattu 21.4.2022]

IEA. Biofuels for the marine shipping sector: An overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations. IEA Bioenergy, 2017. Saatavissa: <https://www.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf>

Hirdaris, S.E.; Cheng, F. The role of technology in green ship design. In Proceedings of the 11th International Marine Design Conference (IMDC), Glasgow, UK, 11–14 June 2012. [Viitattu 22.4.2020]

Dallas, S. Power quality analysis for greener shipping by implementing an on-board electric power quality monitoring system. *J. Mar. Eng. Technol.* 2019, 1. [Viitattu 20.4.2022]

Dai, L.; Hu, H.; Wang, Z.; Shi, Y.; Ding, W. An environmental and techno-economic analysis of shore side electricity. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2019, 75, s. 223–235. [Viitattu 20.4.2022]

Zis, T.P. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transp. Res. Part A Pol. Pract.* 2019, 119, s. 82–95. [Viitattu 20.4.2022]

Schwartz, H.; Gustafsson, M.; Spohr, J. Emission abatement in shipping—is it possible to reduce carbon dioxide emissions profitably? *J. Clean. Prod.* 2020.

Schmidt, O.; Hawkes, A.; Gambhir, A.; Staffell, I. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. *Nat. Energy* 2017, 2, 1–8. [Viitattu 20.4.2022]

DNV GL. Offshore Wind: The Power to Progress. Technical Report. 2019. Saatavissa: [Dnvgl.com](https://www.dnvgl.com)

Mahapatra, M.K.; Singh, P. Fuel cells: Energy conversion technology. In *Future Energy*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014; s. 511–520 [Viitattu 16.4.2020]

Sadek, I.; Elgohary, M. Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study. *Environ. Sci. Poll. Res.* 2020. [Viitattu 16.4.2020]

Saito, N. The Economic Analysis of Commercial Ships with Hydrogen Fuel Cell Through Case Studies. Master of Science Thesis, World Maritime University, Malmo, Sweden, 2018.

DNV GL. Study on the Use of Fuel Cells in Shipping. Technical report commissioned by EMSA. Saatavissa: <http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2016%20EMSA%20Study%20on%20the%20use%20of%20Fuel%20Cells%20in%20Shipping.pdf>

Balcombe, P.; Brierley, J.; Lewis, C.; Skatvedt, L.; Speirs, J.; Hawkes, A.; Staffell, I. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conv. Manag.* 2019, 182, s. 72–88.

IMO. Second IMO GHG Study; International Maritime Organization: London, UK, 2009.

Winnes, H.; Styhre, L.; Fridell, E. Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Res. Transp. Bus. Manag.* 2015, s. 73

Zis, T.; Psaraftis, H.N. Operational measures to mitigate and reverse the potential modal shifts due to environmental legislation. *Marit. Policy Manag.* 2019, s. 117–119.

Kim, J.G.; Kim, H.J.; Lee, P.T.W. Optimizing ship speed to minimize fuel consumption. *Transp. Lett.* 2014.

Woo, J.K.; Moon, D.S.H. The effects of slow steaming on the environmental performance in liner shipping. *Marit. Policy Manag.* 2014.

Styhre, L.; Winnes, H. Energy efficient shipping—between research and implementation. In Proceedings of the IAME 2013 Conference, Marseille, France, 2013.

Psaraftis, H.N. (Ed.) Green maritime transportation: Market based measures. *In Green Transportation Logistics. International Series in Operations Research & Management Science*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2016.

Balcombe, P.; Brierley, J.; Lewis, C.; Skatvedt, L.; Speirs, J.; Hawkes, A.; Staffell, I. How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conv. Manag.* 2019, s. 72–88.

Nikolakaki, G. Economic incentives for maritime shipping relating to climate protection. *Wmu J. Marit. Aff.* 2013.

Moffat, J. Arranging deckchairs on the titanic: Climate change, greenhouse gas emissions and international shipping. *Austl. NZ Mar. LJ* 2010, s. 104.

Gu, Y.; Wallace, S.W.; Wang, X. Can an Emission Trading Scheme really reduce CO₂ emissions in the short term? Evidence from a maritime fleet composition and deployment model. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2019, s. 318–325.

Papaefthimiou, S.; Sitzimis, I.; Andriosopoulos, K. A methodological approach for environmental characterization of ports. *Marit. Policy Manag.* 2017, s. 81.