

Väinö Hotti

MERILIIKENTEEN PÄÄSTÖVÄHEN- NYSTEKNIIKAT SATAMISSA

Opinnäytetyö

Logistiikan insinööri

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Väinö Hotti
Työn nimi	Meriliikenteen päästövähennystekniikat satamissa
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
Vuosi	2022
Sivut	58 sivua
Työn ohjaaja(t)	Salla Vaahersalo, Elias Altarriba

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tavoitteena tarkastella ja käsitellä meriliikenteen päästövähennystekniikoita ja -menetelmiä ja niiden vaikutuksia satamien toimintaan, infrastruktuuriin sekä turvallisuuteen. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, minkälaisia muutoksia eri menetelmät ja ratkaisut vaativat satamilta, ratkaisujen mahdollisia hyötyjä ja heikkouksia tämänhetkiseen tilanteeseen verrattuna. Aluksi tutkimuksessa käydään läpi meriliikenteen päästörajoitukset nyt ja tulevaisuudessa, joiden saavuttamiseen eri päästöttekniikoita voidaan verrata. Tutkimuksen pääasiallinen sisältö koostuu erilaisten vaihtoehtoisten polttoaineiden, pakokaasujen jälkikäsitelymenetelmien ja vaihtoehtoisten moottoriratkaisujen tarkastelusta. Tutkimuksen sisältö on tulevaisuuden valintoja kohden suunnattu, sillä meriliikenteen päästörajoitteet kiristyvät reilusti tulevina vuosikymmeninä.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, tutkimus tehdään osana ammattikorkeakoulun MEPTEK-hanketta. Tämä opinnäytetyö on laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus, jonka sisältö perustuu olemassa olevaan materiaaliin tutkimuksen eri aiheista. Tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuustutkimusta, ja aineisto perustuu internetistä saatavilla oleviin tutkimuksiin, selvityksiin sekä EU:n ja IMO:n julkaisuihin ja säädöksiin.

Tutkimus antaa selkeän kuvan työssä käsitellyistä päästövähennysmenetelmistä yleisellä tasolla, sekä niiden vaikutuksista ja huomioitavista seikoista satamien päivittäisessä operoinnissa, infrastruktuurissa ja turvallisuudessa. Eri menetelmien päästövähennyksiä verrataan myös tuleviin EU:n ja IMO:n päästörajoihin, joka antaa osviittaa menetelmien investointien kannattavuudesta, sillä tulevaisuudenkestävyys on tärkeää vihreän siirtymän alkaessa. Tiettyjen menetelmien yhteydessä otetaan myös huomioon satamissa ja niiden välittömässä läheisyydessä syntyvät päästövähennykset. Tutkimuksen kohteina ovat vaihtoehtoiset polttoaineet ja muut päästövähennysmenetelmät voivat olla hyvin erilaisissa kehityksen vaiheissa, mikä on otettava huomioon. Tutkimus antaa uutta näkökulmaa MEPTEK-hankkeelle, jonka tavoitteena on vertailla meriliikenteen päästövähennysmenetelmiä kokonaisuudessaan.

Asiasanat: meriliikenteen päästöt, päästövähennystekniikka, satamainfrastruktuuri

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Väinö Hotti
Thesis title	Effects of marine emission reduction technologies on ports
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2022
Pages	58 pages
Supervisor	Salla Vaahersalo, Elias Altarriba

ABSTRACT

The main goal of this thesis was to review and inspect different marine emission reduction technologies and their effects on port operations, infrastructure and safety. The purpose of this study was to determine what types of changes and alterations from different technologies are required for implementation in port infrastructure and operations, and the advantages and disadvantages of the reviewed technologies compared to the current and future situation of emissions. The first part of this study focuses on reviewing and summarizing the situation of maritime emission limits and their future development. The strictest long-term emissions limits will work as a point of comparison for the effectiveness of the reviewed emission reduction technologies. The main part of this study consists of multiple reviews of common marine emission reduction technologies and possible solutions, such as alternative maritime fuels, exhaust aftertreatment systems and alternative propulsion systems. This study aims to give insight towards future choices regarding different emission reduction technologies, as a change is starting to happen towards a greener marine shipping sector.

This thesis was commissioned by the South-Eastern Finland University of Applied Sciences, and the study was conducted as a part of the university's MEPTEK project. It is a qualitative study based on the review material collected from digital public resources and some of the project's and university's internal resources. The research method was literature review and content analysis of collected material.

The study gives a clear overview of the reviewed the emission reduction technologies, and their effects and notable factors in the normal operation, safety, and infrastructure of ports. The effectiveness of the reviewed methods is also compared to the future marine emissions limits set by the IMO and EU to gauge their viability in the long term. Possible emission reduction happening specifically in port areas is also highlighted due to the perspective of the study. The different methods and technologies reviewed are in varying stages of development, which has to be noted in any comparisons. This study aims to add a new perspective to the research done in the MEPTEK project.

Keywords: marine emissions, emission reduction technology, port infrastructure

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
1.1	Tutkimuksen tausta ja rajaukset	6
1.2	Teoreettinen viitekehys	7
1.3	Tutkimusmenetelmät	8
2	MERILIIKENTEEEN KIRISTYVÄT PÄÄSTÖRAJOITUKSET	8
2.1	MARPOL-yleissopimus	9
2.1.1	Liite VI – Prevention of Air Pollution from Ships	10
2.2	EEDI	12
2.3	Fit for 55	13
2.3.1	FuelEU Maritime	14
2.3.2	Päästökauppa	15
3	VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET	17
3.1	LNG & LBG	19
3.2	LPG	27
3.3	Metanoli	29
3.4	Biopolttoaineet HVO & FAME	32
4	MUITA PÄÄSTÖNVÄHENNYSMENETELMIÄ	35
4.1	Rikkipesurit	36
4.2	SCR & Urea	38
4.3	Maasähkö	39
4.4	Hybridi- ja sähkötoimiset alukset	42
4.5	Polttokennot	44
4.6	Ydinvoima	46
	YHTEENVETO	49
	JOHTOPÄÄTÖKSET	51
	LÄHTEET	53

1 JOHDANTO

Maapallolla luonnollisestikin tapahtuva kasvihuoneilmiö on kiihtynyt huomattavasti ihmiskunnan aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen noustessa. Merkityksellisimmät kasvihuonekaasupäästöt ovat hiilidioksidi (CO₂) ja metaani (CH₄). Näitä kaasuja syntyy yleisimmin fossiilisten eli uusiutumattomien polttoaineiden käyttämisestä. Meriliikenteen pakokaasupäästöissä merkityksellisiä ovat lisäksi rikin oksidit (SO_x), typen oksidit (NO_x) ja erilaiset pienhiukkaspäästöt niiden ympäristövaikutusten takia. Kasvihuoneilmiön ja ilmaston lämpenemisen hidastamiseen on herätty viime vuosikymmeninä ja varsinkin EU on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi. Vaikka meriliikenteen avulla kulkee 90 % maailmankaupasta, se aiheuttaa vain 2,6 % maailman kasvihuonepäästöistä. Pienestä osuudesta huolimatta meriliikenteen päästöille on asetettu kiristyvät rajat varsinkin tulevaisuuden kehitykselle. (Suomen Varustamot s.a.)

Tämän opinnäytetyön aiheena on tutkia eri meriliikenteen päästövähennysmenetelmien ominaisuuksia, vaatimuksia ja hyötyjä lähinnä satamien ja satamatoiminnan näkökulmasta. Meriliikenteen päästönvähennysmenetelmissä on tulossa muutos, jossa päästöjä tullaan yhä enemmän vähentämään vaihtoehtoisilla polttoaineilla, joten tämän tutkimuksen päästömenetelmiä käsittelevä osuus on suhteellisen painottunut tulevaisuuteen.

Pääasiallisina tutkimuskysymyksinä tässä opinnäytetyössä ovat seuraavat:

- Minkälaisia vaikutuksia eri päästövähennysmenetelmillä on satamissa?
- Mitä huomioitavaa on eri menetelmien käytössä satamien toiminnan, infrastruktuurin ja turvallisuuden kannalta?
- Miten eri menetelmien saavuttamat päästövähennykset yltyvät IMO:n ja EU:n tulevaisuuden päästörajoihin?

Alakysymyksinä pyritään myös vastaamaan seuraaviin:

- Onko menetelmillä vaikutuksia satamissa tapahtuviin päästöihin?
- Miten käsitellyt menetelmät soveltuvat kaupalliseen meriliikenteeseen?
- Minkälaisia hyötyjä ja haittoja menetelmien käytöllä on yleisellä tasolla?

Tarkoituksena on luoda tutkimus, jonka tulosten perusteella voidaan helposti vertailla eri päästömenetelmien sovellettavuutta tarpeisiin sekä tarvittavia muutoksia satamainfrastruktuuriin. Luonnollisesti kaikki meriliikenteessä käyttöön otetut tai suunnitellut päästönvähennysmenetelmät eivät vaikuta satamien toimintaan, tässä käsitellään lähinnä satamiin kohdistuvia vaikutuksia eri päästötekniikoiden käyttöönotosta ja käytöstä. Tavoitteena ei ole niinkään vertailla päästönvähennystekniikoita toisiinsa, vaan tutkia niiden ominaisuuksia, etuja ja haittoja sekä niiden vaikutuksia satamien toimintaan ja infrastruktuuriin. Tutkimuksessa kuitenkin tarkastellaan objektiivisesti eri päästönvähennysmenetelmien mahdollisuuksia ja rajoittavia tekijöitä.

1.1 Tutkimuksen tausta ja rajaukset

Meriliikenteen päästöjä ja niiden vähennystekniikoita on tutkittu monipuolisesti sekä laajasti, mutta satamien kannalta asiaa ei ole juuri käsitelty. Tutkimuksessa on tarkoitus käsitellä yleisimmät päästövähennysmenetelmät yleisellä tasolla sekä tarkemmin satamien näkökulmasta. Tarkastellaan tarvittavia muutoksia ja olennaisia eroavaisuuksia satamien infrastruktuuriin nyt ja tulevaisuudessa. Monet käsitellyt vaihtoehtoiset polttoaineet päästönvähennysmenetelminä ovat käytössä hyvin vähäisesti, sillä suurin osa meriliikenteestä toimii edelleen perinteisillä polttoaineilla, kevyellä ja raskaalla polttoöljyllä. Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) ja EU:n asettamien kiristyvien päästörajojen takia meriliikenteen polttoainevalinnoissa tulee todennäköisesti syntymään perustavanlaatuisen muutos seuraavina vuosikymmeninä, sillä monet yleistyvät vaihtoehtoiset polttoaineet alittavat tiukimmat suunnitellut päästörajat ilman suurta panostusta pakokaasujen jälkikäsittelyyn, toisin kuin korkearikkinen polttoöljy, joka vaatii pakokaasujen jälkikäsittelyä ja tuottaa silti reilusti hiilidioksidia. Myös SECA-alueilla yleisesti käytössä olevat matalarikkiset fossiiliset polttoaineet ylittävät tulevat päästörajat hiilidioksidipäästöjen osalta. (DNV GL 2019, 10.) Vaihtoehtoisilla polttoaineilla päästöjen madaltaminen ja päästötavoitteiden saavuttaminen on myös EU:n toivomaa, sillä EU:n jatkuva tavoite on uusiutuvien energianlähteiden ja polttoaineiden yleistyminen ja fossiilisten polttoaineiden käytön vähentyminen. (Euroopan Komissio s.a.)

Aiheen rajaus on selkeä, tutkimuksessa käsitellään vain satamien toimintaan vaikuttavia päästönvähennysmenetelmiä, sillä tämän tutkimuksen tuloksen on

tarkoitus selkeyttää satamatoiminnalle ja satamien infrastruktuurille pakollisia muutoksia eri päästövähennystekniikoiden käyttöönoton yhteydessä. Tämän lisäksi työssä keskitytään lähinnä meriliikenteestä syntyvien pakokaasupäästön päästövähennystekniikoihin, eli ilmaan pääsevien päästöjen vähennystä. Muutkin meriliikenteestä syntyvät päästöt ovat hyviä tutkimuskohteita, mutta pakokaasupäästöt ovat merkityksellisin meriliikenteen päästömuoto ja sen vaikutukset ovat ilmastoon nähden suurimmat. Siksi pakokaasupäästöille onkin asetettu eniten rajoituksia ja niitä seurataan tarkimmin.

IMO:n päästörajoitteet ja -tavoitteet ovat voimassa kaikilla merialueilla, mutta EU:n säädökset ovat luonnollisesti voimassa vain Euroopan unionin merialueilla. EU:n Green Dealin mukana asetettujen päästörajoitteiden taka-ajatukseksi on myös niiden laajeneminen lopulta EU:n ulkopuolelle IMO:n avulla. Tutkimuksessa ei oteta kantaa päästövähennysmenetelmien paremmuuteen toisiinsa verrattuna, kunhan menetelmät täyttävät IMO:n ja EU:n asettamat tavoitteet. (EU Green Deal Office. 2021.)

Tämä opinnäytetyö tehdään osana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun MEPTEK-hanketta. Alun perin tarkoituksena oli tehdä opinnäytetyö itsenäisesti, mutta ohjaajan suositusten mukaisesti löysin kyseisen hankkeen, jonka tavoitteet vastasivat hyvin ajatuksiani. Vaikka kasvihuonepäästöt eivät ole henkilökohtaisessa elämässäni merkityksellisiä, koen päästöttekniikan ja meriliikenteen pakosta muuttuvan polttoainetilanteen mielenkiintoisena sekä hyvin ajankohtaisena.

1.2 Teoreettinen viitekehys

Tutkimuksen teoreettisen viitekehysten ensimmäinen osuus koostuu meriliikenteen päästöaiheisista tutkimuksista sekä EU:n ja IMO:n määrittämistä säädöksistä, asetuksista ja määräyksistä. Näistä saadaan pohjustus, jonka perusteella käsitellään erillisiä päästövähennystekniikoita ja niiden vaikutuksia suhteessa päästöihin sekä satamatoimintaan. Toisen osan kehyksestä muodostaa yleiset ja itsenäiset tutkimukset ja selvitykset erillisten päästövähennystekniikoiden ja vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin vaatimuksista ja ominaisuuksista. Tämä osuus tuo varsinaisen käsiteltävän sisällön tutkimukseen, sillä tutkimus perustuu lähinnä itse päästövähennystekniikoiden käsittelyyn ja

tutkimiseen satamatoiminnan näkökulmasta, eikä meriliikenteen päästöjenhallinnan lainsäädännölliseen näkökulmaan tai päästönvähennysmenetelmien vertailuun.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tämä opinnäytetyö laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus, jossa tarkastellaan satamien tilannetta meriliikenteen päästötoiminnan osalta nykyhetkessä ja lähitulevaisuudessa. Jokaiseen päästönvähennysmenetelmään liittyvä teknologia kehittyy edelleen, joten vertailu menetelmien välillä jätetään vähiin. Menetelmien tarkastelussa käsitellään vain tekniikan nykytilan käyttöönottoa, mutta useimpien vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria on kehitetty reilusti, eikä käyttö ei ole vielä ehtinyt yleistyä.

Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuusselvitys, aineisto perustuu internetistä sekä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun kirjastosta löytyvistä teoksista. Materiaali koostuu EU:n ja IMO:n säännöksistä sekä päästönvähennystekniikkakohtaisista selvityksistä ja tutkimuksista.

Kirjallisten lähteiden tapauksessa tärkeää on sisällön ajankohtaisuus, joten varsinkin päästönvähennysmenetelmien tutkimuksiin tutustuesssa tiedon relevanttius on ehdotonta. Joissakin tapauksissa tutkimuksen alkuperämaa täytyy ottaa huomioon, mahdollisten ilmastollisten rajoitteiden tai muiden olosuhteiden takia.

2 MERILIIKENTEEN KIRISTYVÄT PÄÄSTÖRAJOITUKSET

Merkittävimmät tahot merenkulun ympäristölainsäädännössä ovat Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, jonka säädökset ovat voimassa ympäri maailman, sekä Euroopan komissio, jonka määräysvalta toimii EU:n merialueilla. Itämerellä toimii Itämeren merellisen ympäristön suojelukomissio HELCOM, ja jokaisen maan omilla aluevesillä on voimassa maan kansallinen lainsäädäntö.

Meriliikenteen päästöihin on alettu keskittymään vasta parin viimeisen vuosikymmenen aikana, sillä merirahdin korkea tehokkuus tonnikipometriin nähden todettiin pitkään hyväksi, eikä kansainvälisten päästöratkaisujen tekeminen

ollut poliittisesti helppoa. Ilmastonmuutoksen tutkimus ja meriliikenteen kasvi-huonekaasupäästöjen sekä ympäristön vaikutuksiin herääminen on saanut suuria muutoksia tapahtumaan päästövähennystekniikoiden kehityksessä ja käyttöönotossa. Suurimmat askeleet otettiin vuosituhannen vaihteessa, jolloin IMO:n MARPOL-sopimuksen konferenssissa sovittiin kasvihuonepäästöjen vähentämisestä ja päästövähennystekniikoiden kehittämisestä. (IMO begins work on GHG emissions. s.a.)

2.1 MARPOL-yleissopimus

Kansainvälisen merenkulkujärjestön muodostama MARPOL-yleissopimus (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) on merenkulun ympäristösuojelun ja -lainsäädännön merkittävin sopimus. Alun perin koottu 1973, ensimmäiset MARPOL-yleissopimuksen säädökset tulivat voimaan 1983. Vuonna 1997 julkaisut yleissopimukseen lisätty liite VI (astui voimaan 2005), joka asettaa rajoitteita ilmaan syntyville päästöille, on nykypäiväisten meriliikenteen päästösäännösten pohja ja todennäköisesti merkityksellisin lisäys MARPOL-sopimukseen ja meriliikenteen päästövähennysmenetelmien kehitykseen. MARPOL-sopimuksen sisältö jakautuu kuteen tekniseen liitteeseen, joista jokainen sisältää säännöksiä liitteessä määritellyille meriliikenteen päästöjen ja saastuttamisen vähentämisen osa-alueille normaaleissa operatiivisissa tilanteissa sekä mahdollisissa onnettomuus- tai häiriötilanteissa. (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. s.a.)

Ensimmäisessä liitteessä annetaan määräyksiä onnettomuuksissa tapahtuvien öljyvuotojen vähentämiseksi ja eliminoimiseksi. Lisäksi liite sisältää määräyksiä operationaalisissa toiminnoissa meriveteen pääsevien öljypäästöjen vähentämiseksi, kuten pilssivesien öljynerotus tai öljyisten pesuvesien käsittely. (MARPOL Annex I. s.a.)

Liitteessä II käsitellään haitallisten ja myrkyllisten nesteiden bulkkikuljetuksesta mahdollisesti syntyviä vuotoja, niiden käsittelyä ja ennaltaehkäisyä. Haitallisiksi luokitellut bulkkilastatut nesteet jaotellaan Liitteen II mukaisesti neljään kategoriaan nesteen välittömän haitallisuuden ja vuototapauksessa tarvittavien toimenpiteiden perusteella. (Carriage of chemicals by ship. s.a.)

Liite III sisältää lisää määräyksiä haitallisten aineiden säilytyksestä, lastauksesta ja kuljetuksesta aluksilla. Liitteen määräykset koskevat haitallisia aineita, jotka eivät kuulu Liitteen II määrittelmien haitallisten bulkkinesteiden alle, kuten kuiva irtorahti, kiinteät aineet sekä erillispakatut aineet ja kemikaalit.

Liite IV koskee alusten tuottamien jätevesien käsittelyä, kieltää jätevesien laskeamisen suoraan vesistöihin ja asettaa tiukat parametrit alusten jätevesien käsittelymekanismeihin ja mihin käsitellyt jätevedet voidaan laskea, mikäli jätevedet täytyy päästää vesistöihin. (Prevention of Pollution by Sewage from Ships. s.a.)

Liite V käsittelee aluksilla syntyvän jätteen käsittelyä ja hävitystä ja asettaa tiukat rajoitteet minkälaisia jätetyyppejä voidaan päästää vesistöihin, lähtökohtaisesti suurin osa aluksilla syntyvästä jätteestä tulee säilyttää aluksilla ja hävittää asianmukaisesti vasta satamissa. Liite velvoittaa myös osallistuvien maiden satamia varmistamaan soveltuvan vastaanottoinfrastruktuurin jätteiden ja muiden aluksilta poistettavan käytetyn materiaalin käsittelyyn satamissa. (Prevention of Pollution by Garbage from Ships. s.a.)

2.1.1 Liite VI – Prevention of Air Pollution from Ships

MARPOL-yleissopimuksen kuudes ja (tähän mennessä) viimeinen liite asettaa rajoituksia ilmaan pääseville päästöille. Alun perin vuonna 1997 julkaistu ja 2005 voimaan tullut tekninen liite asetuksineen asetti rajat alusten pakokaasupäästöille rikin sekä typen oksidien osalta sekä kielsi otsonikatoa aiheuttavien yhdisteiden tahallisen päästön ilmakehään aluksilta.

Samana vuonna nopeasti liitteen voimaan tulon jälkeen meriympäristön suojelukomitean (MEPC) kokouksessa päätettiin liitteen sisällön ja asetusten uudistamisesta ja kiristämisestä, sekä päästörajoitettujen merialueiden (emission controlled area ECA) käyttöönotosta. Liitteen VI päivitetty versio julkaistiin 2008 ja se astui voimaan 2010. Päivitetty versio kuudennesta liitteestä (2008) toimii pohjana lähes kaikille nykyaikaisille meriliikenteen pakokaasupäästöjen rajoituksille ja asetuksille. 2010 voimaan astunutta versiota on edelleen uudistettu useampaan otteeseen, esim. ajankohtaisiksi todettujen rajoitusmuutoksien käyttöönottoon. Liitteen VI (ja muun MARPOL-sopimuksen) sisältö muuttuu ja uudistuu tarpeeksi nähdäin väliajoin, joten sopimuksen ja sen liitteiden sisältö

pysyy suhteellisen ajankohtaisena koko ajan. Kuudennen liitteen sisältö on luonnostaan nopea muuttumaan, sillä nykyaikana keskitytään jatkuvasti enemmän kasvihuonepäästöjen vähentämiseen sekä ilmastonmuutoksen hidastamiseen, johon pakokaasupäästöt vaikuttavat eniten meriliikenteen toiminnassa.

Liitteessä VI asetetaan pääasiallisesti rajoitteet meriliikenteen pakokaasupäästöihin rikin ja typen oksidien sekä pienhiukkasten osalta. Liitteessä määrätään myös päästörajoitettujen merialueiden (ECA) käyttöönotosta paikallisten merialueiden suojelemiseksi. Kyseiset merialueet voivat rajoittaa alueilla tapahtuvia rikki- ja/tai typpipäästöjä (sulphur emission controlled area SECA ja nitrogen emission controlled area NECA). (Prevention of Air Pollution from Ships. s.a.)

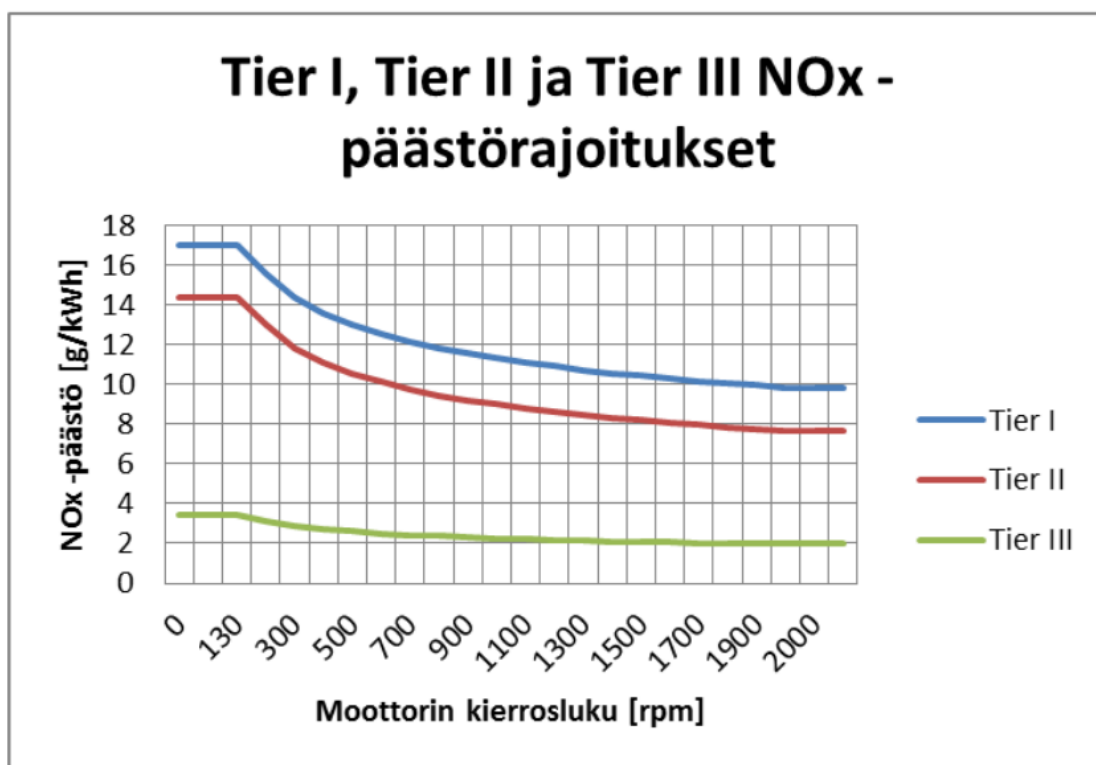
Liitteessä asetetut tällä hetkellä voimassa olevat rikkipäästöjen rajat ovat seuraavat: (Traficom. 2021).

- päästörajoitetuilla merialueilla 0,1 % 1.1.2015 alkaen
- rajoitettujen alueiden ulkopuolella 0,5 % 1.1.2020 alkaen.

Typpipäästöjen rajoituksille Liitteessä VI on asetettu kolme tasoa, riippuen aluksen päämoottorin sertifiointista ja asennuspäivästä. Päästötaso-vaatimukset seuraavasti: (Traficom. 2021).

- Tier I: aluksen pääkoneet, asennettu 1.1.2000–1.1.2011
- Tier II: aluksen pääkoneet, asennettu 1.1.2011–1.1.2021
- Tier III: aluksen pääkoneet, asennettu 1.1.2021 ja sen jälkeen.

Alusten moottoreihin sovellettavat päästörajat päästötason sisällä riippuvat moottorin tarkoitetusta toimintanopeudesta, sillä yleistetyksi raskaampia aluksia liikuttavat suuritehoiset moottorit käyvät hitaammin. (IMO 2014, 285.)



Kuva 1. Tier I, II ja III NOx – päästörajoitukset (Traficom)

Rikin ja typen oksidien päästörajoitusten lisäksi Liitteessä VI asetetaan rajoituksia tai kieltoja monille muille ilmaan pääseville päästöille tai päästölähteille, kuten pienhiukkaset, VOC-päästöt (haihtuvat orgaaniset yhdisteet) ja otsonikatoa aiheuttavat yhdisteet. Rajoituksia asetetaan koskemaan mm. aluksilla tapahtuvaa jätteenpolttoa, nestemäisten ja kiinteiden jätteiden säilytys- ja hävitystointä sekä polttoöljyjen laatuvalvontaa. (Prevention of Air Pollution from Ships. s.a.)

2.2 EEDI

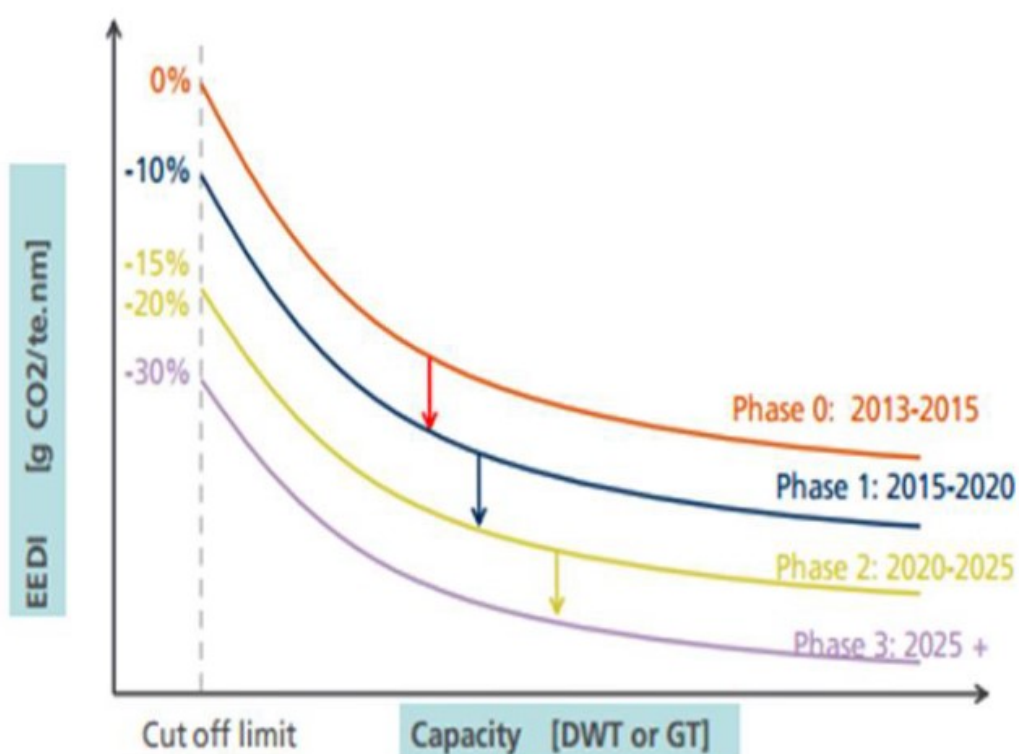
EEDI (Energy Efficiency Design Index) eli energiatehokkuuden suunnitteluindeksi on IMO:n säätämä tekninen standardi, joka asettaa energiatehokkuuden tavoitteita uusille aluksille. Teknisten tietojen perusteella jokaiselle alukselle määrätään EEDI-vertailuarvo, joka tulee alittaa, EEDI ei kuitenkaan koske kaikkia aluksia, vain säädöksessä mainittuja aluskokoja ja -tyyppejä ja lähtökohtaisesti pakollinen vain aluksille, joiden kokonaisvetoisuus on yli 400 tonnia.

EEDI:n asettamat vaatimukset uusien alusten energiatehokkuuteen tulevat voimaan asteittain: (IMO. 2016, 31.)

- Alkuvaihe voimassa 2013–2015
- Ensimmäinen vaihe voimassa 2015–2020

- Toinen vaihe voimassa 2020–2025
- Kolmas vaihe voimassa 2025 eteenpäin.

Suunnitteluindeksi asettaa vaatimuksia uusien aluksien energiatehokkuuden tavoitteisiin jo alusten suunnitteluvaiheessa, ja alusten valmistajien tulee varmistaa tavoitteiden täyttäminen haluamallaan keinoilla, riippuen myös muista alusten päästöjen lainsäädännöllisistä säädöksistä. EEDI:n vaatima energiatehokkuus ilmoitetaan CO₂-päästöjen suhteena aluksen tonnikipometriin tai ”tonnimerimailiin”. Jokaiselle EEDI:n säädösten alaiselle alustyyppille on vetoisuuden alaraja, jonka alittavia aluksia EEDI ei koske. (IMO. 2019.)



Kuva 2. Päästöjen lasku vaiheittain prosentteina (IMO. 2016.)

2.3 Fit for 55

Fit for 55 on EU:n ehdottama valmiuspaketti, jonka tavoitteena on vähentää unionin alueella syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä, suhteessa vuoden 1990 päästöjen tasoon. Valmiuspaketti sisältää useita ehdotettuja muutoksia, joilla saadaan laskettua EU:n sekä jäsenmaiden omakohtaisia kasvihuonekaasupäästöjä.

55-ilmastopaketti on EU:n asettama lainsäädännöllinen keino vähentää unionin kasvihuonekaasupäästöjä ja edelleen lähestyä EU:n tavoitetta olla täysin ilmastoneutraali (hiilineutraali) vuoteen 2050 mennessä. (Euroopan Komissio. 2021a, 0–1.) Valmiuspaketin sisältö ja yksityiskohdat eivät ole vielä täysin valmiita käyttöönottoon, sisältö on ollut Euroopan parlamentin käsittelyssä syysystä 2021, ja uudet toimenpiteet on suunniteltu otettavaksi käyttöön joustavasti vuosien 2022–2023 aikana. Tavoitteiden tiukkuuden ja toimintaehdotusten laajuuden takia päästöratkaisujen käyttöönotto tulee vaikuttamaan lähes kaikilla toimialoilla. Ehdotettujen muutosten perusteella Suomessa suurimmat vaikutukset tulevat syntymään mm. metsä-, rakennus-, energia- ja metalliteollisuudelle sekä logistiikan alalle. (Green Deal Office. 2021.) Meriliikenteen toimintaan vaikuttavimmista uusista ehdotetuista muutoksista ja toimenpiteistä merkittävimmät toimivat keppiperiaatteella, sanktioilla ja syntyvillä lisäkustannuksilla pyritään nopeuttamaan meriliikenteen ympäristöystävällisyyden paraneamista.

2.3.1 FuelEU Maritime

Yksi komission ehdotuksista Fit for 55-paketin päästötavoitteiden saavuttamiseksi meriliikenteen osalta on FuelEU Maritime -aloite. Sen tavoitteena on avustaa meriliikenteen hiilineutraaliuden tavoittelemisessa, edistää ja kannustaa varustamoita siirtymään matalahiilisiin tai hiilivapaisiin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin ja asettamalla kiristyviä rajoitteita aluksissa käytettävien polttoaineiden kasvihuonekaasuintensiteettiin. EU:n säätämänä meriliikenteen päästötavoitteena on olla täysin hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. (ECSA. 2021, 4–5.)

EU on ehdottanut seuraavia tavoitteita kasvihuonekaasuintensiteetin laskuun perinteisistä polttoaineista matalahiilisiin tai hiilivapaisiin polttoaineisiin siirtymisellä: (Euroopan komissio. 2021b, 41.)

- 2 %:n vähennys polttoaineiden hiili-intensiteetissä 2025 mennessä
- 7 %:n vähennys 2030 mennessä
- 14 %:n vähennys 2035 mennessä
- 26 %:n vähennys 2040 mennessä
- 60 %:n vähennys 2045 mennessä
- 75 %:n vähennys 2050 mennessä

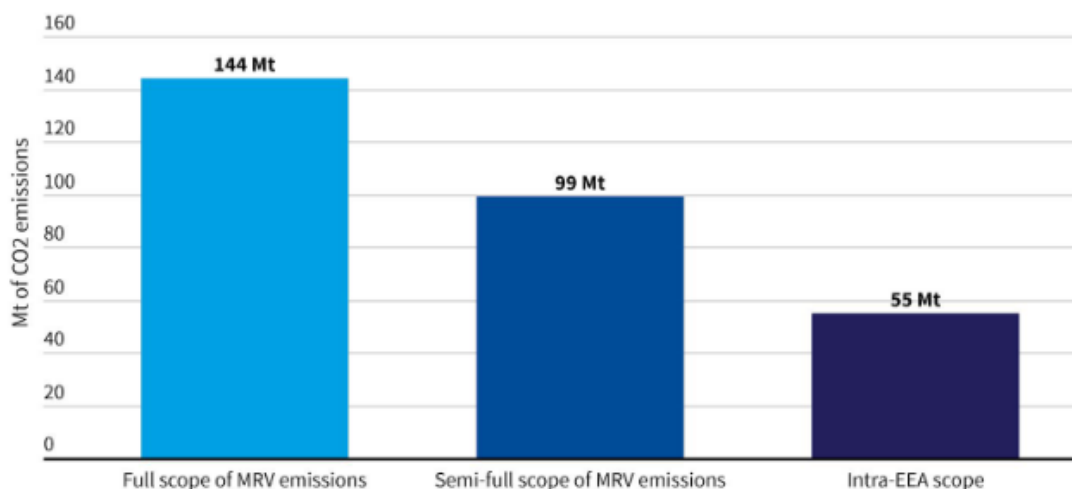
FuelEU Maritime -aloite on saanut reilusti negatiivista palautetta, sillä siinä ehdotetut tavoitteet ovat erittäin tiukkoja. Tavoitteena on siirtyä mahdollisimman nopeasti ympäristöystävällisempiin polttoaineisiin, mutta aloite ei tue mitenkään vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä tai niihin liittyvää toimintaa tai tutkimusta. Vaihtoehtoinen polttoainetekniikka ja liittyvä infrastruktuuri on täysin kehitysvaiheessa ja massiiviset investoinnit puolivalmiiseen teknologiaan sanktioiden uhallalla ovat närkästyttäneet monia alan toimitsijoita sekä varustamoita. Kehitysvaiheessa olevan alustekniikan lisäksi suurin osa vaihtoehtoisista polttoaineista ovat myös tuotannossa ja tuotannon kehityksessä vielä alkutekijöissään. Uusiutuvien ja hiilineutraalien polttoaineiden tuotanto ja tarjonta ei vastaa lähellekään FuelEU -aloitteen ennustamaa muutosta parempien polttoaineiden kysyntään. (Transport & Environment. 2021.)

2.3.2 Päästökauppa

Fit for 55-paketin mukana esiteltiin myös muutos, jonka perusteella meriliikenteen hiilidioksidipäästöt tullaan lisäämään EU:n päästökauppaan (Emissions Trading System ETS). CO₂-päästöjen lisäkustannukset ajaisivat varustamoita yhä enemmän käyttämään vähähiilisiä ja hiilivapaita polttoaineita. Päästökauppaan joutuisivat osallistumaan kaikki EU:n vesialueilla liikkuvat alukset, joiden bruttovetoisuus on yli 5000 tonnia. Meriliikenteen sisällyttäminen EU:n päästökauppaan tapahtuisi asteittain seuraavan kolmen vuoden aikana.

Päästökauppa vaatii EU:n aluevesillä liikkuvien aluksien ostavan päästöoikeuksia aluksien päästöihin nähden. Päästöoikeuksia tulee ostaa, mikäli alus käy matkallaan EU:n vesialueilla. Ehdotuksen mukaan päästöoikeuksia maksettaisiin kaikista EU:n aluevesien sisällä ja EU-satamissa tapahtuvista CO₂-päästöistä, sekä 50 % matkan päästöistä, jos matka alkaa tai loppuu EU:n vesillä. Huolimatta minkä lipun alla alus purjehtii. (Offshore Energy. 2021.) Päästöjen seuranta perustuu EU:n MRV-seurantajärjestelmään (Monitoring, Reporting, Verification), joten kaikki uuden päästökaupan säännösten puitteissa EU:n vesialueilla liikkuvien alusten tulee liittyä MRV-toimintaan. Päästökaupan vaatiman seurantajärjestelmän hyötynä olisi toivottava MRV-seurantajärjestelmän yleistyminen ympäri maailman, sillä siten meriliikenteen päästöseuranta parani kokonaisvaltaisesti. Kansainvälisesti on myös käytössä kevyempi IMO:n

DCS-datankeräysjärjestelmä (Data Collection System). (Transport & Environment. 2020, 3–6.)



Kuva 3. EU:n sisäiset päästöt suhteessa päästöoikeuksia vaativiin päästöihin. (Transport & Environment. 2020.)

Päästökauppa tulee lisäämään varustamoiden kuluja, joten kunnes alusten CO₂-päästöt saavuttavat tavoiteltavat päästörajat, on mahdollista, että jotkin varustamot lopettavat operoinnin EU:n vesillä, mikäli se on mahdollista eikä laske suhteessa enempää tuottomarginaaleja verrattuna tarvittavien päästöoikeuksien hintoihin. Todennäköistä on, että varsinkin pienemmät varustamot tulevat mieluummin maksamaan päästöoikeuksista, eivätkä tee suuria investointeja kaluston päästöjen vähennykseen lyhyellä aikavälillä.

Olettaen, että (EU:n) meriliikenne tulee onnistuneesti siirtymään vaihtoehtoihin polttoaineisiin tai muihin hiilivapaisiin ratkaisuihin 2050 mennessä, meriliikenteen merkitys EU:n päästökaupassa tulee laskemaan huomattavasti. Päästökauppaan osallistuminen ei suoraan kannusta hiilivapaisiin polttoaineisiin siirtymiseen, vain yksinkertaiseen CO₂-päästöjen vähennykseen. Yhdessä kiristyneiden päästörajoitusten ja energiatehokkuusvaatimusten kanssa meriliikenne tulee siirtymään hiilivapaaseen toimintaan ennemmin tai myöhemmin, sillä kaikki perinteisen raskaan polttoöljyn käyttöön perustuvat päästönvähennysmenetelmät ylittävät hiili-intensiteetille asetetut rajoitteet viimeistään kahden vuosikymmenen aikana. EU:n tavoitteena on olla meriliikenteen osalta täysin hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä, mikä käytännössä tarkoittaisi kaikkien kaupallisten alusten siirtymistä hiilivapaisiin polttoaineisiin.

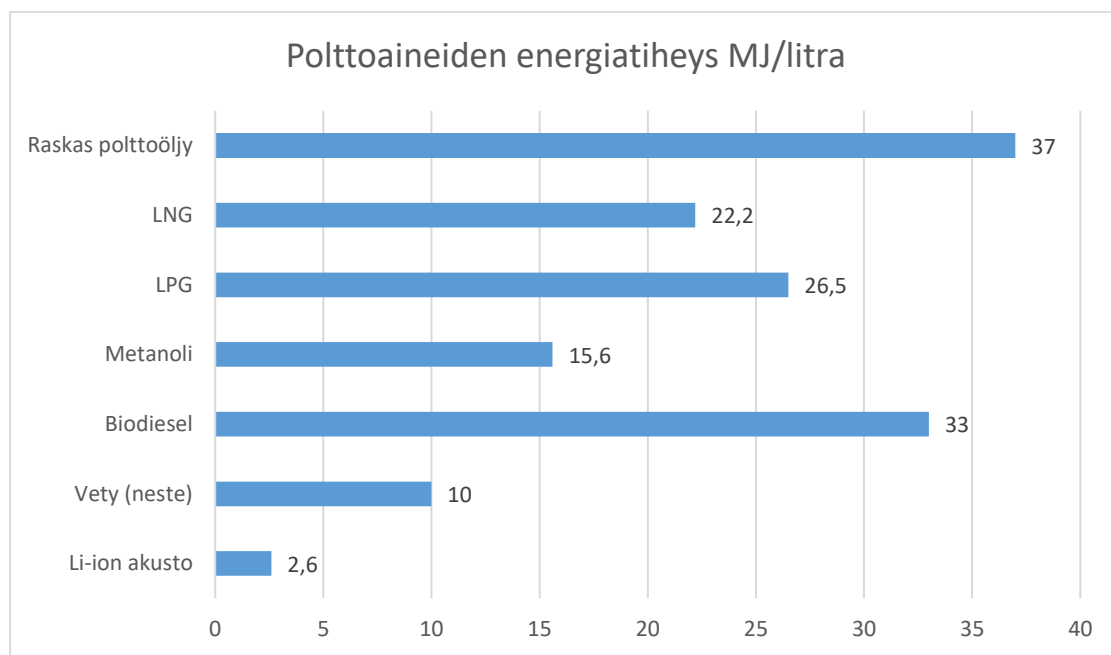
3 VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET

Tulevaisuuden päästötavoitteiden saavuttamiseksi on meriliikenteessä tehtävä suuria muutoksia alusten käyttövoimaan, sillä raskas polttoöljy alittaa kiristyvät päästörajat vain tiettyyn pisteeseen, eikä täytä EU:n hiilineutraaliustavoitetta. EU sekä IMO kannustaakin varustamoita ja valmistajia siirtymään vaihtoehtoiisiin polttoaineisiin. Vaihtoehtoisia polttoaineita valitsemalla lasketaan useimmissa tapauksissa kaikkia aluksista syntyviä kasvihuonekaasuja ja muita ilmaansaasteita, kuten pienhiukkasia tai rikin oksideja, sekä vähennetään meriliikenteen hiilijalanjälkeä.

Monet uudet polttoaineet vaativat käyttämiseen muutoksia tai kokonaan uuden polttoaineinfrastruktuurin aluksissa ja satamissa, ja siksi siirtyminen perinteisestä polttoöljystä on hidasta. Käyttöönottoa hidastaa myös uusien polttoaineteknologioiden hidas ja vielä vähäinen kehitys. Tarve laajalle ja nopealle kehitykselle vähähiilisille ja hiilivapaille polttoaineille meriliikenteen käyttöön on tullut vasta viimeisten vuosien aikana, EU:n ja IMO:n asettamien päästötavoitteiden takia.

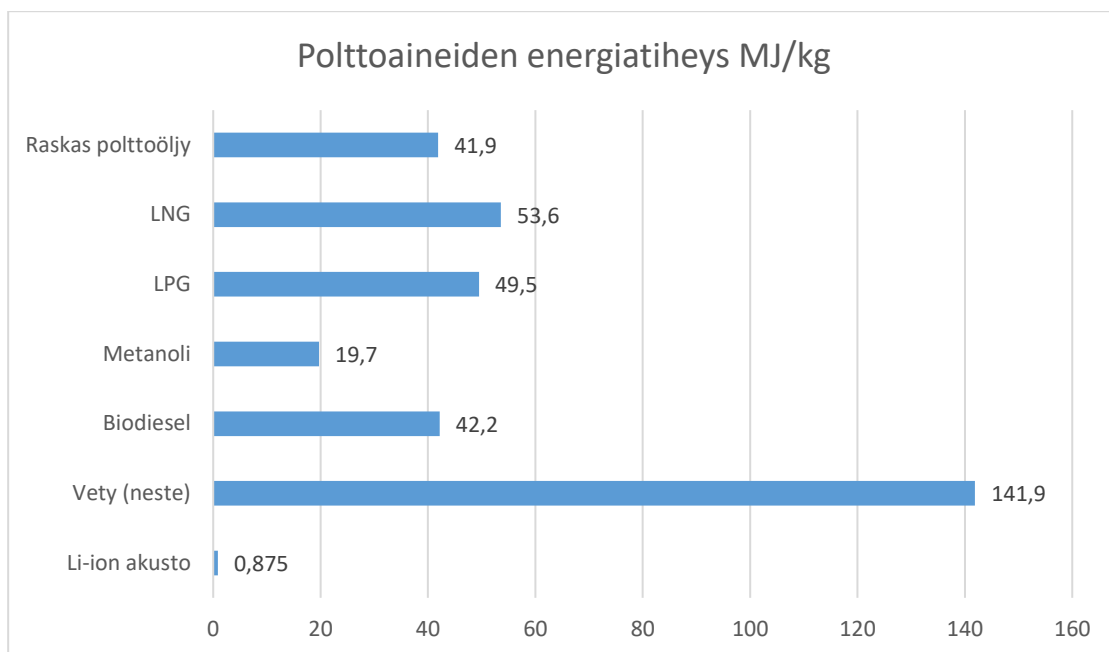
Satamien näkökulmasta vaihtoehtoisten polttoaineiden tärkeimpiä ominaisuuksia ovat tankkaus- ja säilöntäinfrastruktuuri, kuljetus sekä niihin liittyvät riskit. Tässä tutkimuksessa käsitellyistä vaihtoehtoisista polttoaineista osa pystyy hyödyntämään tehokkaasti jo olemassa olevaa satamien polttoaineinfrastruktuuria ja jotkin suuremmilla muutoksilla. Monet ratkaisut vaativat kuitenkin infrastruktuuria, joka ei pohjaudu ollenkaan nykyhetken ratkaisuihin, ja vielä vaatii massiivisia investointeja pelkän polttoainekohtaisen tekniikan kehittämiseen, puhumattakaan käyttöönottovalmiista ratkaisuista satamien käyttöön. Jotkin ratkaisut eivät välttämättä vaadi satamilta juurikaan erillistä tekniikkaa alusten tankkaamiseen, kuten maasähkön hyödyntäminen ankkuroituna tai erittäin harvoin ”tankattavat” ydinvoimalla toimivat alukset. Tämänhetkiset tankkaustoiminnot perustuvat lähinnä laiturille tulevista säiliökuorma-autoista tankkaamiseen. Varsinkin suurkaupunkien yhteydessä sijaitsevissa satamissa maa-alueet ovat kalliita ja huonosti saatavilla, joten vähemmän pinta-alaa vievä alusten polttoaineisiin liittyvä infrastruktuuri on huomattava etu. Siihen suoraan liittyen itse polttoaineen hyvä energiatiheys on huomioitava polttoainevalintoja tehtäessä nyt ja

tulevaisuudessa. Satamien polttoainevarastoinnissa energiatiheys massan mukaan ei ole niinkään tärkeää kuin tilavuuden kannalta, sillä yleisesti polttoainesäiliöt rakennetaan maaperälle, jolloin painolla ei ole suurta merkitystä. Suurissa aluksissa volumetrinen energiatiheys on edelleen merkityksellisempi kuin gravimetrinen energiatiheys (massan mukaan), sillä rahtialusten maksimikoko on vakiintunut kapeimpien vesiväylien koon mukaan (kanavat ja kanaalit).



Kuva 4. Yleisimpien polttoaineiden energiatiheys tilavuuden kannalta. Wikipedia.

Kuten Kuvasta 4 selviää, perinteiset nestemäiset polttoaineet ovat tehokkaampia energiatihedeltään moniin vaihtoehtoisin ratkaisuihin verrattuna. Raskas polttoöljy käyttää tilavuuden tehokkaimmin, ja siten vaihtoehtoiset ratkaisut ovat selkeästi huonommassa asemassa heti alkuun. Mielenkiintoisena vertailukohteenä on ydinvoima ja sen käyttämä uraani, jonka volumetrinen energiatiheys ydinreaktion polttoaineena on 1 539 842 000 MJ/Litra. Ydinvoima alusten käyttövoimana vaatii huomiota muilla osa-alueilla, mutta polttoaineiden varastoinnin viemä tila satamissa tai aluksissa ei ole juurikaan ongelma, sillä ydinpolttoainesauvojen käyttöikä on yli viisi vuotta ja jopa yli 20.



Kuva 5. Yleisimpien polttoaineiden energiatiheys painon kannalta. Wikipedia.

Kuva 5 näyttää polttoaineiden energiatihedysten ratkaisujen massan kannalta, asetelma tuo uutta näkökulmaa, mutta kyseinen näkökulma ei ole meriliikenteen kannalta hyödyllinen, mutta se kertoo monien ratkaisujen verrattain samantasoisista energiatihedyksistä massan kannalta. Nestemäinen vety on erinomainen ratkaisu, jos tilavuus ei ole merkityksellinen kriteeri käyttöönotossa. Litium-ioni akuston energiatiheys on matalin massan sekä tilavuuden kannalta, mutta akkuteknikka on kehittymässä jatkuvaa tahtia, joten on todennäköistä, että akkutoiminen alus tulee olemaan ajallaan varteenotettava ratkaisu myös pidemmän matkan aluksille.

3.1 LNG & LBG

Kaasuja voidaan paineistaa ja jäähdyttää niiden tilavuuden pienentämiseksi, toimenpiteen yhteydessä kaasu muuttuu nestemäiseksi. Saman kaasumäärän viemä tilavuus nestemäisenä voi pudota jopa noin 0,16 %:iin. Tilavuuden massiivisessa pienentämisessä on selkeä etu kuljetukselle ja varastoinnille, vaikka nestemäisen kaasun varastointi vaatii selkeästi monimutkaisempia ratkaisuja kuin kaasumuodossa varastointi. Nestekaasujen varastoinnissa tärkein seikka on kaasujen kiehumispiste. Kaasun kiehumisen estämiseksi kaasut voidaan jäähdyttää ja paineistaa. Jäähdytys vaatii luonnollisesti myös lämpötilan ylläpitoa, joka lisää varastoinnin monimutkaisuutta ja hintaa.

Maakaasu (Natural Gas), on suurimmaksi osaksi metaanista koostuva kaasu, jota tuotetaan maasta poraamalla, erikseen sekä öljynporaustoiminnan sivutuotteena. Maakaasua käytetään pääasiassa energiantuotantoon, mutta sitä käytetään myös lisääntyen ajoneuvojen polttoaineena sekä asuntojen lämmitykseen osassa maailmaa.

Kaasumuodossa maakaasu käyttää huomattavan paljon tilavuutta, ja siksi yleisimmin maakaasu tiivistetään nestemäiseen muotoon varastointia ja kuljetusta varten, nesteytettynä sama kaasumäärä vie noin 1/600 tilavuudesta. Maakaasu nesteytetään jäähdyttämällä kaasu lämpötilaan noin -160°C . Matalan lämpötilan ylläpitäminen aiheuttaa monimutkaisen varastoinnin perinteisiin nestemäisiin polttoaineisiin verrattuna. Nesteytettyä maakaasua nimitetään LNG:ksi, Liquefied Natural Gas. LNG:n energiatiheys on suhteellisen hyvä, saatavuus ja tuotannon määrä on hyvä jo nyt ja siihen liittyvä varastointi- ja kuljetusteknologia on kehittynyt, joten LNG on vaihtoehtoisista polttoaineista kenties parhaassa asemassa korvaamaan perinteisen raskaan polttoöljyn meriliikenteen käyttövoimana. LNG on kuitenkin fossiilinen polttoaine. (Wärtsilä. 2015.)

Biokaasu (liquefied biogas) koostuu pääasiassa metaanista, kuten maakaasu, mutta nimensä mukaisesti biokaasun metaani tuotetaan uusiutuvasti. Varsinainen biokaasu on tuotantoreaktiossa syntyvää metaanin, hiilidioksidin ja epäpuhtauksien yhdistelmää, mutta varsinaiselta nimeltään puhdistetun biometaanin nimitykseksi on silti vakiintunut biokaasu (biogas). Biokaasua tuotetaan biohajoavasta jätteestä, kuten ihmisten tuottamasta ruoka- ja biojätteestä, ulosteesta, jätevesilaitoksien tuottamasta lietteestä, maatalouden tuottamasta lannasta ja biomassasta sekä muusta biohajoavasta materiaalista. Mikrobit tuottavat biomassaa hajottaessaan metaania, joka erotetaan muista hajoamisprosessissa syntyvistä tuotteista kaasutuotantolaitoksilla. Biokaasun rinnalla syntyvää digestaattia/mädätettä voidaan käyttää mm. maatalouden lannoitteena tai jatkojalostaa muihin käyttötarkoituksiin. Biokaasun tuotantoprosessi vapauttaa myös reilusti hiilidioksidia. Hyvälaatuinen puhdistettu biokaasu on toiminnaltaan ja käyttökelpoisuudeltaan identtinen maakaasun kanssa, joten sillä pystytään korvaamaan maakaasun käyttö lähes missä tahansa käyttötarkoituksessa. Se pystyy myös hyödyntämään maakaasun infrastruktuuria normaalisti. (Gasum. s.a.)

Maakaasun ja biokaasun (95–98 % metaania) varastointi perustuu kaasun nesteyttämiseen sen tilavuuden laskemiseksi. Näiden kaasujen tapauksessa nesteyttäminen edellyttää kaasujen jäähdyttämisen noin -162°C , joka on lähellä kaasun kiehumispistettä, jäähdytyksen lisäksi nestemäinen kaasu paineistetaan kevyesti, jolloin kiehumispiste nousee. Nestemäisten kaasujen erittäin matala lämpötila ja sen ylläpitäminen vaikeuttaa varastointia ja bunkrausta, matala lämpötila aiheuttaa lähes välittömän jäätymisen, jos laitteissa on vähänkään kosteutta, myös pienet epäpuhtaudet voivat aiheuttaa ongelmia nestemäisten kaasujen bunkrauksessa. Metaani on voimakas kasvihuonekaasu, joten sitä ei saa vuotaa ilmaan ja siksi LNG ja LBG on pidettävä täysin eristyksissä ulkoilmasta tai muista epäpuhtauksista, joten perinteinen nesteiden varastointiin ja siirtoon käytettävä tekniikka ei sovellu ollenkaan nestemäisten kaasujen käsittelyyn. (Wärtsilä. 2015.) Maa- ja biokaasun varastointiin ja laitteistoon maalla sovelletaan pääasiassa Euroopan standardeja BS EN 1473, CSN EN 14620-1 & 14620-2. Euroopan standardien vaikutuksen ulkopuolisilla alueilla voidaan käyttää maakohtaisia standardeja, kuten Yhdysvaltojen NPFA 59A, ACI 376 ja API 620, tai Kansainvälisen standardoimisjärjestön (ISO) tuottamia standardeja. (DNV GL. s.a.)

Maalla LNG ja LBG varastoidaan perinteisesti suurissa maanpäällisissä tai osittain upotetuissa tankeissa. Suurimmat tankit ovat kapasiteetiltaan jopa 200 000 kuutiometriä (Osaka Gas. 2017.) nesteytettyä kaasua, jäähdytetyn kaasun lämpötilan säätely ja tankkien paineensäätely on jokseenkin kätevämpää pienemmissä tankeissa, joissa paineentasauksen vaativat kaasumäärät ovat huomattavasti pienempiä, ja ”ylivuodon” talteenotto helpompaa. Pääasiassa metaanista koostuvien kaasujen vuotojen estäminen on tärkeää, sillä metaani on erittäin voimakas kasvihuonekaasu.

Nestemäisten kaasujen erittäin matalan lämpötilan ylläpitämiseksi säilytystankit ovat erittäin tehokkaasti eristettyjä ympäröivästä ilmasta ja maaperästä. Kun tankissa olevan nestemäisen kaasun tilavuus pysyy samana ja lämpötila nousee, tankissa vallitseva paine nousee. Tankkien paine tulee pitää asetettujen rajojen sisällä kaasun siirtotoimintojen toimivuuden varmistamiseksi, joten tankeista joudutaan säännöllisesti päästämään painetta. Kun tankeista päästetään kiehumispisteen saavuttavaa nestemäistä kaasua ja paine laskee, ilmiö jäähdyttää tankissa olevaa nestemäistä kaasua kiehumispisteen alapuolelle

(autorefrigeration), tätä ilmiötä hyödyntämällä varastoitu kaasu saadaan pidettyä nesteytettynä ilman erillisiä jäähdytyslaitteita käyttämällä jäähdytykseen itse kaasua. Monilla maakaasun tuotanto- tai varastointialueilla on kuitenkin laitteisto, jolla kiehunut kaasu saadaan uudelleen nesteytettyä (reliquefaction system) ja palautettua säilytystankkeihin. Uudelleennesteytyslaitteisto on kuitenkin vartenotettava investointi, sekä sen viemä pinta-ala satama-alueella saattaa olla rahallisesti paremmin käytetty muuhun toimintaan.

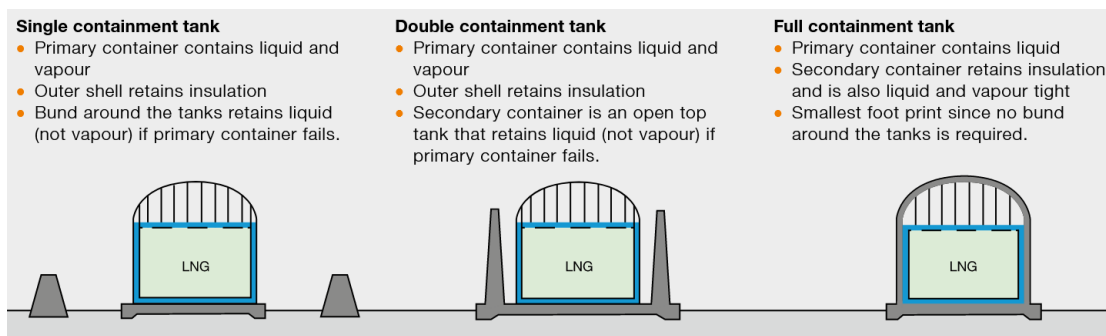
Erittäin matalan lämpötilan takia kaikki kryogeenisten (erittäin kylmien) nesteiden säilytykseen ja käsittelyyn suunnitellut välineet ja laitteet täytyy suunnitella toimimaan ja kestävänsä erittäin kylmiä lämpötiloja. Venttiilien, pumppujen ja muiden liikkuvien osien täytyy olla jäätymättä pysyäkseen toiminnassa. Nesteytettyjen kaasujen tapauksessa jäätymisriski on vain laitteiden ulkopuolella, sillä putkistoissa ja venttiilien kautta kulkevat kylmät kaasut ovat puhdistettu täysin kosteudesta, muuten laitteiden sisäosat jäätyisivät välittömästi, eivätkä virtaukset säilyisi tarpeen mukaisina. Erittäin kylmien lämpötilojen vaikutus aiheuttaa hiljalleen myös kylmäaurastumista, jossa esim. metallien joustavuus heikkenee merkittävästi ja voi siten johtaa murtumiseen. Kylmäaurastumisen takia lähes kaikki nesteytettyjen kaasujen varastointiin ja kuljetukseen tarkoitettujen tankkien ja välineiden sisimmät pinnat valmistetaan nikkeliteräksestä, joka on vahvempaa ja kylmäaurastumisen riski on huomattavan pieni. (PURA. 2021.) Kylmäaurastumisen ja lämpötilavaihteluiden aiheuttamien rasiushalkeamien välttämiseksi nesteytettyjen kaasujen varastointitankkien sisäseinät eivät ole jäykästi kiinnitettyjä muuhun tankin rakenteeseen, vaan sisempien ja ulompien seinämien välillä on vain joustavia eristemateriaaleja, ja siten kylmin sisäseinämä ei pääse suoraan säteilemään kylmää tankin tukirakenteisiin.

Maalle rakennettuja LNG:n säilytystankkeja on yleisesti ottaen kahta tyyppiä: tyhjiöeristettyjä sekä perinteisemmällä eristysmateriaaleilla eristettyjä tankkeja. Teollinen tyhjiöeristäminen on modernein ja tehokkain eristysmenetelmä. Tyhjiöeristeet päästävät erittäin vähän lämpöä lävitseen, joten säilytettävä maakaasu tai biokaasu pääsee lämpenemään mahdollisimman vähän. Mitä kylmempänä nesteytetty kaasu saadaan pidettyä, tankkien paine voidaan pitää matalampana, ja siten tarve ylipaineen vapauttamiseen syntyy harvemmin ja lämpötilan ja paineen tasaamiseen vaadittava vapautettavan kaasun määrä vähenee. Moderni tasapohjainen tyhjiöeristetty säiliö joutuu vapauttamaan

keskimäärin 0,05–0,1 % säilytetyn kaasun volyymistä päivässä halutun lämpötilan ja paineen ylläpitämiseksi. (Wärtsilä. 2015.) Vapautettu kaasu voidaan nesteyttää uudelleen tai käyttää energiantuotantoon satamassa, tuotantolaitoksella, aluksella tai lähiympäristössä.

Tyhjiöeristeiset tankit ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia ja monimutkaisempia rakentaa kuin perinteisesti eristetyt tankit. Suuret tankit ovat myös hitaampia ja vaativampia rakennettavia tyhjiöeristeisinä, joten rakennushankkeiden kulut nousevat entisestään. Yksinkertaisemmat, vain perinteisiä eristemateriaaleja hyödyntävät varastointitankit ovat usein pienempiä kuin tyhjiöeristetyt tankit, sillä perinteisten eristeiden eristyskyky on heikompi. Keskimäärin perinteinen eristetty tankki käyttää päivässä 0,05–0,15 % kaasusta paineentasaukseen, mutta haarukan alimmat lukemat saavutetaan lähinnä painetta nostamalla, joka ei sovellu pitkäaikaisempaan säilytykseen. Pienemmissä säiliöissä ja pienemmillä täyttövolyymeilla paineentasauksien kaasumäärät ovat pienempiä, joten investoinnin korottaminen sisältämään tyhjiöeristeisiä tankkeja ei ole välttämättä kannattavaa pidemmälläkään mittakaavalla. Perinteisesti eristetyt tankit soveltuvat myös hyvin sijainteihin, joissa tankeista tyhjennetään (ja täytetään) usein, sillä täyttöasteen vaihdellessa paineentasaukseen käytettävä kaasumäärä jää marginaaliseksi, sillä täyttämisen ja tyhjennyksen yhteydessä tankin sisäinen paine voi vaihdella reilusti.

Paineen alaisen, erittäin helposti syttyvän kaasun ja metaanin voimakkaiden kasvihuonevaikutusten takia LNG:n ja LBG:n varastoinnissa turvallisuus on erittäin tärkeää, ja siksi varastointialueen tai -tankkien tulee pystyä hallitsemaan mahdollinen vuoto. Ratkaisuista riippuen tankkien viemä pinta-ala voi vaihdella reilusti. Vahvemmat seinämärakenteet ja sisäiset kaasutiivisteet ovat kalliimpia rakentaa, mutta kokonaisuuden viemä pinta-ala on pienempi. Varsinkin kaupunkien yhteydessä olevien satamien varastointitankkien viemä pinta-ala voi olla suhteellisesti hyvinkin kallista.



Kuva 6. Single, double & full containment tank. (Wärtsilä. 2018.)

Kuvassa 6 esitetään selkeästi yksinkertaisempien tankkityyppien vaatimat turva-alueet ja muurit mahdollisen nestevuodon pysäyttämiseksi. Kolmas tankkityyppi on täysin suljettu ja pitäisi pystyä kestäämään sisäisen seinämän murtuminen tai purkautuminen ilman ulkoista vuotoa. (Wärtsilä. 2018.)

Bunkraus tapahtuu suurimmassa osassa satamista enimmäkseen säiliöautoilla tai bunkrausaluksilla. Bunkrausalus tai -säiliöauto pysähtyy tankattavan aluksen viereen, johon polttoaine pumpataan. Isoilla satamilla tai satamien lähellä sijaitsevien jalostamoiden tai kaasutuotantolaitosten yhteydessä saattaa olla bunkraustermiinaaleja, joissa alukset voidaan tankata suoraan laituriin asennetusta bunkrauslaitteistosta, mutta bunkraustermiinaalien käyttö vaatii aluksilta erillistä pysähdystä ja laituriin kiinnittymistä.

Nesteytettyjen kaasujen bunkraus toimii yhtä lailla säiliöautojen ja bunkrausalusten avulla, kuten raskaan polttoöljyn ja muiden perinteisten aluspoltoaineiden kanssa, mutta nesteytettyjen kaasujen kanssa työskentely vaatii enemmän koulutusta monimutkaisuuden ja suurempien riskien takia. Toisin kuin polttoöljyn kanssa, kaasut eivät saa missään nimessä vuotaa ilmakehään ja kaasun kanssa kosketuksissa olevat pinnat tulee pitää puhtaana epäpuhtauksista ja kosteudesta. Kaasut ovat myös paineistettuja ja bunkraus tapahtuu paineen alaisena.

Teoreettisesti ihanteellinen ratkaisu bunkraukseen olisi kaikkien sataman laiturielle bunkrauslaitteiston asentaminen, jolloin erillisiä tankkaus pysähdyksiä tai bunkrausaluksia ei tarvittaisi, mutta putkistojen, laitteistojen ja varastoinnin rakentaminen ja ylläpitäminen on suuri investointi ja vie reilusti tilaa satama-alueilta. Bunkrausalusten käyttö on huomattavasti joustavampaa, kuten sataman ulkopuolella odottavien alusten tankkaus. Laiturissa alusten tankkaus

säiliöautoista ei vaadi sataman infrastruktuurilta juuri mitään ja on huomattavasti edullisempaa kuin bunkrausaluksen operointi. Säiliöautojen avulla tankkaus saattaa kuitenkin olla pitkällä aikavälillä olla kalliimpaa ja se aiheuttaa ylimääräisiä kasvihuonekaasupäästöjä kuorma-autoista. Toiminnaltaan nesteytettyjen kaasujen tankkauslaitteisto on monimutkaisempaa ja teknisesti vaativampaa kuin vastaava laitteisto perinteisille polttoöljyille, sillä kaasut on pidettävä paineistettuna sekä erittäin kylmässä lämpötilassa. Tästä syystä maanalaisten putkistojen käyttäminen on suurempi investointi ja todennäköisesti ylläpidoltaan vaativampi. Satamatoimintojen laajuuden satama-alueilla ja LNG-terminaalien rakentamisen kalleuden takia bunkrausterminaalit eivät ole välttämättä kannattavia investointeja, ainakaan välittömässä tulevaisuudessa. Esim. Helsingin satama on ilmaissut LNG-terminaalin rakennuksen kannattamattomaksi, ainakin tällä hetkellä. LNG:n kulutus ja sitä tankkaavat alukset kuitenkin yleistyvät, joten aito tarve bunkrausterminaalille saattaa syntyä. (Port of Helsinki. 2017. 6.)

Maakaasusta on povattu raskaan polttoöljyn korvaajaksi mm. kevyempien kasvihuonepäästöjen, hyvän saatavuuden ja hyvällä tasolla olevan teknologian takia. Maakaasulla ja biokaasulla on kuitenkin selkeitä heikkouksia sellaisenaan, sekä raskaaseen polttoöljyyn verrattuna. LNG ei kuitenkaan ratkaise aiheen kaikkia ydinongelmia, ja vaatii panostusta omiin heikkouksiin, ennen kuin polttoaineesta on kansainväliseksi meriliikenteen polttoaineratkaisuksi. Huomioon on otettava maakaasun fossiilinen alkuperä, joten maakaasu ei ole täysin tulevaisuudenkestävä ratkaisu, mikäli hiilineutraalius on tavoitteena.

Päästöjen kannalta LNG parantaa kohtuullisesti merkittävimmillä osa-alueilla raskaaseen polttoöljyyn verrattuna. LNG:n käyttö perinteisissä moottoreissa tuottaa parhaimmillaan noin 30 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin vastaava raskaan polttoöljyn käyttö. Luonnostaan LNG on rikkivapaa, joten se tulee aina alittamaan tulevaisuuden rikkipäästörajat, myös pienhiukkaspäästöjen määrä jää lähes marginaaliseksi. Moottoriratkaisuista riippuen LNG:n käyttö alittaa IMO:n Tier 3 -tyyppipäästörajat ilman pakokaasun jälkikäsitteilyä, mutta jotkin 2-tahtiset moottorityypit vaativat silti EGR- tai SCR-pakokaasunkäsittelyä. Metaanipäästöt ovat LNG- ja LBG-teknologioiden merkityksellisin päästömuoto, sillä normaalioperoinnissa metaania polttava (LNG & LBG) päästää reilusti metaania pakokaasujen mukana. Metaani on hiilidioksidia huomattavasti

voimakkaampi kasviuonekaasu, joten metaanipäästöt ovat merkityksellisempiä. LNG:n ja LBG:n käytössä voidaan mm. eri moottoriratkaisuilla vaikuttaa metaanipäästöjen syntymiseen, valitettavasti useimmissa tapauksissa metaanipäästöjä vähentäessä hiilidioksidipäästöt nousevat, ja polttoöljyyn nähden LNG:n CO₂ -päästövähennys laskee noin 10–20 %:iin. (DNV GL. 2019. 9–22.)

Biokaasu LBG on kemiallisilta ominaisuuksiltaan identtinen maakaasun kanssa, joten palamisreaktiossa syntyvät päästöt ovat myös vastaavia. Biokaasun valmistusprosessissa siihen sitoutuu hiilidioksidia, joten pakokaasupäästöjen hiilidioksidista huolimatta biokaasu luokitellaan hiilineutraaliksi polttoaineeksi.

Maakaasun tuotantoa on reilusti ympäri maailmaa, sillä se toimii mm. kemianteollisuuden raaka-aineena ja voimanlähteenä energiantuotannossa. Tuotantoa tulisi kuitenkin lisätä massiivisella tasolla, mikäli maailman meriliikenne haluttaisiin muuttaa käyttämään maakaasua. Maakaasua on käytetty jo pitkään, joten siihen liittyvä teknologia ja laitteisto on hyvällä tasolla, vaikkakin kehitys on jatkuvaa ja maakaasuteknologiassa käytetään useita edelleen kehittyviä tekniikoita, kuten tehokkaat eristeet, kryogeniikka ja erityyppiset moottorit, jotka voivat hyödyntää LNG:tä tai useampia polttoaineita.

Biokaasun tuotanto on pitkälle kehittyntä, varsinkin Euroopassa, mutta maakaasun verrattuna korkean hinnan ja siten pienemmän kysynnän takia biokaasun tuotanto jää hyvin pieneksi maakaasuun tuotantomäärään verrattuna. Tuotantopotentiaalia on hyvin, mutta globaalisti ratkaisuksi biokaasun tuotanto vaatii tehokkuuden kehitystä sekä reilusti lisää tuotantokapasiteettia. (DNV GL. 2019. 27–29.)

Nesteytetyn maakaasun ja biokaasun käytön suurimmat heikkoudet liittyvät lähinnä nesteytettyjen kaasujen vaatimaan varastointi- ja kuljetusinfrastruktuuriin, joka on polttoöljyn infrastruktuuriin verrattuna huomattavasti monimutkaisempaa, kalliimpaa sekä vaativampaa ylläpidolta ja käytöltään.

LNG ja LBG-käyttöiset moottorit, jotka ovat optimoitu tuottamaan mahdollisimman vähän CO₂ -päästöjä, tuottavat reilusti metaanipäästöjä, joita on ehdottomasti vähennettävä kasviuonekaasupäästöjen kokonaisuuden parantamiseksi, sillä voimakkaampana kasviuonekaasuna metaani kumoaa helposti

CO₂-päästöissä saadut ympäristöhyödyt. LNG on fossiilisista polttoaineista vähäpäästöisin, mutta sen käyttö lisää silti hiilidioksidin määrää ilmakehässä, ja metaanipäästöt pakokaasusta ja vuodoista on minimoitava.

3.2 LPG

LPG, (Liquefied Petroleum Gas) Suomessa nestekaasuna myytävä propaani tai propaanin ja butaanin sekoitus on yleinen polttoaine ja energianlähde mm. trukeissa, kaasugrilleissa ja monissa lämmityslaitteissa, sekä monien kemianteollisuuden tuotteiden raaka-aine. Nestekaasua tuotetaan pääasiassa raakaöljyn sekä maakaasun jalostuksen yhteydessä, jossa sitä syntyy lähinnä sivutuotteena. Noin 60 % maailman nestekaasusta tuotetaan maakaasuun jalostuksen sivutuotteena, ja loput 40 % raakaöljyn jalostuksen ja öljy- ja kaasuporauksen yhteydessä.

Muihin nesteytettyihin kaasuihin verrattuna nestekaasun säilytys on yksinkertaisempaa, sillä se nesteytyy pienemmässä paineessa ja korkeammassa lämpötilassa. Suhteessa korkeamman kiehumislämpötilan takia LPG:n varastointi ei vaadi välttämättä jäähdytystä ympäröivästä lämpötilasta, vaan jäähdytys voidaan korvata paineen nostolla. (STOREMASTA. 2021.) Nestekaasu on edullisinta varastoida paineistetuissa jäähdyttämättömissä tankeissa, jolloin säilytys- ja bunkraustoiminta ei vaadi erittäin alhaisiin lämpötiloihin soveltuvaa tekniikkaa (kryogeniikka). Tavanomaisen paineistetun kaasun varastointiin sovelletaan Euroopan Komission ATEX ja PED-direktiivejä. Nestekaasua (propaania) voidaan tuottaa myös uusiutuvasti, mutta sen tuottaminen yksinomaan ei ole vielä kannattavaa. BioLPG:tä tuotetaan biodieselin valmistuksen sivutuotteena. (SHV Energy. s.a.)

Nestekaasun (LPG) varastointi eroaa vaatimuksiltaan reilusti nesteytettyyn maakaasuun ja biokaasuun verrattuna. Nestekaasun kiehumislämpötila on noin -42°C, joka on huomattavasti maakaasua korkeampi. Suhteessa korkeamman kiehumislämpötilan takia nestekaasua ei tarvitse jäähdyttää nestemäisenä pitämiseksi, paineistaminen riittää. Yksinkertaisemman säilytyksen vuoksi nestekaasu varastoidaan paineistettuna, mutta lämpötilaa säätelemättä. Esim. lämpötilassa 27°C, täysi nestekaasutankki on paineessa n. 8,8 Bar. Paineet ovat

siis huoneenlämmössäkin kohtuullisia, joten yksinkertainen paineistettu varastointi on nestekaasulle käypä ratkaisu. Lämpötilasäätelmätön varastointi kuitenkin tarkoittaa paineen vaihtelua tankeissa, joten ylipaineen välttämiseksi kaikki nestekaasusäiliöt on varustettu varoventtiileillä, jotka aukeavat yleensä paineessa 25 Bar, jolloin nestekaasu on yli 70°C. Nestekaasun tankit ovat yleensä täytetty korkeintaan 80–85 % kokonaiskapasiteetista, loput kapasiteetista on varattu kaasuuntuvalle osuudelle ja lämpötilavaihteluista aiheutuvalle paineenmuutokselle.

Suuremmissa määrin nestekaasua varastoidaan yleisimmin bullet -tyyppisissä säiliöissä, joiden koko vaihtelee noin tuhannesta litrasta neljäänkymmeneentuhanteen litraan. Tankit asennetaan yleensä helppouden takia maan päälle, mutta jotkin asennetaan myös maan alle, vähentäen vahinkoriskiä ja laskien lämpötilaa. Suurimmat nestekaasun varastointisäiliöt ovat usein pallomaisia (Hortonsphere), maan päälle rakennettuja säiliöitä. Pallon muoto soveltuu hyvin korkean paineen kestämiseen, mutta käyttää huonosti tilaa varastointitilavuuteen suhteessa varastointisäiliön kokonaistilavuuteen, tukirakenteet mukaan lukien. (Elgas. 2021.) LPG on LNG:n verrattuna parempi energiatiheydeltään, eikä varastointi vaadi paksuja eristekerroksia tankkeihin, joten tilavuuden hyödyntämisen kannalta LPG on varastoinnilta käytännöllisempää sekä edullisempää kuin LNG.

Nestekaasun bunkrauslaitteisto on tähän mennessä keskittynyt kaasutankkerialusten täyttöön ja tyhjennykseen, mutta teknologia pienempien volyymien toimintaan on jokseenkin kehittyntä. Aluskäytössä nestekaasu polttoaineena on kuitenkin suhteellisen uusi ratkaisu. Nestekaasua jopa 50 vuotta kuljettaneet kaasutankkerit ovat vasta viime vuosina ottaneet kuljettamansa kaasun polttoaineeksi aluksen moottoreihin. Nestekaasun tankkaaminen aluksien polttoaineeksi tapahtuukin lähinnä bunkrausaluksilla tai säiliöautoista laiturissa. Kuten maakaasun kanssa, bunkraustermiinaaleihin investointi on kallista, eikä satama-alueilla ole välttämättä tilaa kaasujen varastointiin laiturien välittömässä yhteydessä. Bunkrausaluksilla tai säiliöautoilla nestekaasu voidaan tuoda kauempaa, esim. kaasutuotantolaitoksen omasta terminaalista tai kaupungin tai sataman ulkopuolella sijaitsevista säilytystankeista.

Varastoinnilta ja laitteistoltaan LPG on teknisesti kevyempää ja edullisempaa kuin LNG tai LBG, mutta nestekaasulla on myös selkeitä heikkouksia, joiden takia LPG on jäänyt tulevaisuuden tutkimuksissa LNG:n varjoon. Polttoöljyyn verrattuna nestekaasun käyttäminen perinteisissä moottoreissa tuottaa parhaimmillaan vain noin 17 % vähemmän CO₂-päästöjä. LPG:n käyttö vähentää pakokaasujen rikkipitoisuuden lähes olemattomiin, sekä pienhiukkasten osuus jää hyvin pieneksi. Moottorityypistä riippuen nestekaasun polton typpipäästöt saattavat ylittää IMO:n Tier 3 -päästöarvot, ja vaativat pakokaasujen jälkikäsitelyä. Kuten maakaasun ja biokaasun kanssa, mahdolliset kaasuvuodot ovat vaarallisia, sillä propaani ja butaani ovat myös voimakkaita kasvihuonekaasuja. Toisin kuin maakaasu, nestekaasu on ilmaa raskaampaa ja siksi vuototilanteet, ilmanvaihto ja riskienhallinta vaativat erilaisen lähestymistavan kuin ylöspäin karkaava metaanikaasu. Painavuutensa takia vuotava LPG kerääntyy herkästi suljettujen tilojen pohjalle, kuten konehuoneisiin tai pilssivesisäiliöihin ja sen poistaminen tuulettamalla on vaikeaa.

LNG:en verrattuna LPG:n vaatima laitteisto kuljetukseen ja säilytykseen on yksinkertaisempaa ja edullisempaa, mutta polttoöljyyn nähden silti vaativampaa ja paikoitellen riskialttiimpaa. Suhteessa vähäisten päästövähennysten takia nestekaasun status vaihtoehtoisena polttoaineena ei ole kovin vahva, varsinkin nestekaasun hinnan ollessa maakaasua korkeampi, ja vain hieman matalarikistä polttoöljyä edullisempaa. Nestekaasu on perinteisessä tuotantomuodossaan fossiilinen polttoaine, mutta propaania voidaan tuottaa myös uusiutuvasti, yleensä biodieselin tuotannon sivutuotteena. Hiilineutraalin nestekaasun tuotanto on suhteessa pientä ja siten markkinahinta on jokseenkin korkea vastaviin fossiilisiin kaasuihin nähden.

3.3 Metanoli

Metanoli on kemiallisesti yksinkertaisin alkoholi, jota käytetään ympäri maailmaa lukuisiin eri käyttötarkoituksiin, kuten kemianteollisuuden, muovien, maalien ja eri rakennusmateriaalien raaka-aineena sekä energiantuotannossa. Suhteessa suuren vetypitoisuuden takia metanolia voidaan käyttää myös yksinkertaisempaan vedyn kuljetukseen ja varastointiin mm. polttokennojen yhteydessä. Metanolia käytetään myös eri ajoneuvojen polttoaineena, sillä sen kemialliset ominaisuudet ovat suhteellisen lähellä bensiiniä ja muita pitkälle

jalostettuja polttoaineita. Meriliikenteessä metanoli ei ole vielä yleistynyt polttoaineena, sillä pelkästään metanolitoimisten merimoottorien kehitys on vasta alkuvaiheessa. (Methanex. s.a.)

Metanolia voidaan tuottaa usealla eri tavalla ja monista eri raaka-aineista. Yleisimmin metanolia tuotetaan teollisesti maakaasusta tai hiilidioksidin ja vedyn yhdistelmästä syntetisoimalla. Metanolin valmistus perustuu joko hiilen ja vetyn yhdisteen jalostukseen (syngas) tai metaanin biosynteesistä syntyvään metanoliin. (National Energy Technology Laboratory. s.a.) Metanolia voidaan myös tuottaa kivihiilestä, teollisuuden talteen otetusta hiilidioksidista sekä monista uusiutuvista hiilidioksidi- ja metaanilähteistä, kuten maatalousjätteestä tai jätetuusta. Uusiutuvasti tuotettu metanoli on fossiiliton polttoaine, sekä täysin hiili-neutraalia. Metanolimolekyylit sisältävät reilusti vetyä ja lähinnä nestemäisenä esiintyvänä aineena metanoli on erinomainen tapa varastoida vetyä esim. polttokennokäyttöä varten. (Fuel Cell Works. 2020.)

Metanoli on nestemäistä -98 – 65°C , joten sitä pystytään käsittelemään ja varastomaan nesteinä lähes aina. Leimahduspiste on kuitenkin vain 9°C , huomattavasti alempi kuin monilla perinteisillä meriliikenteen nestemäisillä polttoaineilla. (Työterveyslaitos. s.a.) Nestemäisyyden takia metanolin varastointiin ja kuljetukseen voidaan hyödyntää polttoöljyn infrastruktuuria, mutta metanolilla on kuitenkin tiettyjä ominaisuuksia, joiden takia muutoksia on tehtävä.

Joustavan säilytyslämpötilan ja paineistamattoman säilytyksen takia metanolin varastointisäiliöiden koko ja muoto voi vaihdella reilusti, mutta metanolin erittäin herkän syttymisen takia erityistä huomiota vaatii nesteen varastoinnin eristys, höyryjen kiinniotto ja käsittely sekä syttymisriskien minimointi. Vuototapauksessa metanoli ei ole välittömän myrkyllinen maastolle, eikä aiheuta kasvihuonekaasupäästöjä, mereen vuotaessa metanoli sekoittuu veteen ja muuttuu jokseenkin harmittomaksi. Erittäin herkän syttymisen lisäksi metanolin varastoinnissa huomioitavaa on, että toisin kuin muut yleiset polttoaineet, metanoli on ns. proottinen liuotin, joten metanolin kanssa kosketuksissa olevat metallit altistuvat herkästi galvaaniselle korroosiolle. Metanolin kanssa kosketuksissa olevat pinnat täytyy valmistaa siis materiaaleista, jotka kestävät metanolia ja metallien valinnassa tulee valita korroosiota kestäviä tyyppisiä. Metanoli on myös hygroskooppinen, joten se imee itseensä kosteutta ja sekoittuu veteen. Siksi

varastoitu metanoli tulisi pitää tehokkaasti eristetyissä säiliöissä, ettei metanoli imeydy kosteutta, sillä kosteus aiheuttaa korroosiota. Mitä enemmän metanoli imee kosteutta, sen käyttöikä heikkenee. Ilmatiiviisti säilytetty metanoli voi säilyä hyvänä vuosia. Metanolin varastointi- ja käsittelylaitteisto perustuu öljypohjaisten tuotteiden ja jalosteiden käsittelyn standardeihin, kuten API 2610, API 650 ja DIN EN 12285-1 & 12285-2.

Polttoöljyn infrastruktuuria voidaan muokata metanolille sopivaksi mm. pinnoittamalla säiliöitä ja kiinteimpiä rakenteita. Maanpäällisiä putkistoja ja pumppukoneistoja voidaan muokata soveltuviksi, mutta vanhojen laitteiden vaihto verrattuna uusiin metanoliyhteensopiviin laitteisiin voi olla paikoitellen kannattava investointi, sillä polttoöljyinfrastruktuuri saattaa olla jo ikääntynyttä. Varastoinnissa on huomioitavaa, että metanolin volumetrinen energiatiheys on selkeästi huonompi kuin perinteisten nestemäisten polttoaineiden, joten metanolitoimisten alusten toimintasäde lyhenee, mikäli polttoainesäiliöiden tilavuus pysyy samana. (Methanol Institute. 2016.)

Maalla metanolin säilytykseen useissa satamissa tai lähialueilla on jo oma infrastruktuuri, sillä metanolia kuljetetaan yleisesti meriliikenteessä. Suhteellisen kevyillä muutoksilla terminaalit voitaisiin ottaa käyttöön myös metanolialusten tankkaukseen. Polttoöljyihin verrattuna huonommasta energiatiheudesta johtuen metanolin bunkraus säiliöautoilla on hitaampaa ja vaatii suhteessa enemmän kuljetuksia. Metanolin bunkrauksessa merkittävintä huomioitavaa on syttymisherkyys, mutta toisin kuin nestemäisten kaasujen kanssa, tankkaus tapahtuu paineistamatta, huomattavasti yksinkertaisemmalla laitteistolla eivätkä mahdolliset vuodot ole ympäristölle kovinkaan vaarallisia. (Wärtsilä. 2021.)

Fossiilisen metanolin käyttö vähentää CO₂-päästöjä vain noin 10 % raskaaseen polttoöljyyn verrattuna, mutta muut päästövähennykset vastaavat jokseenkin nestekaasuja, rikin oksideja sisältävät päästöt vähenevät reilusti polttoöljyyn nähden ja alittavat IMO:n Tier 3 rikkipäästörajat. Myös syntyvien pienhiukkaspäästöjen määrä vähenee huomattavasti, hyväksyttävälle tasolla. Nestekaasujen mukaisesti, typen oksidien päästöt vaihtelevat polttomoottorin tyyppien mukaan, ja kaikissa tapauksissa pakokaasujen jälkikäsittelyyn on investoitava NO_x Tier 3 -päästörajojen alittamiseksi. (DNV GL. 2019. 25–26.) Metanolia voidaan kuitenkin käyttää "polttoaineena" polttokennoissa, joissa pienhiukkasia, typen

tai rikin oksidipäästöjä ei synny ollenkaan, ja hiilidioksidin kokonaispäästöt jäävät mataliksi, tai toiminta on hiilineutraalia, riippuen käytetäänkö uusiutuvasti tuotettua metanolia vai ei. (Energy Industry Review. 2021.) Metanolin eduiksi lukeutuu myös polttoaineinfrastruktuurin hyödyntäminen, hyvä tuotannon taso sekä pitkälle kehittynyt teknologia (meriliikenteen ulkopuolella), jota pystytään soveltamaan tehokkaasti meriliikenteeseen, kun tarvetta syntyy ilmastopakotteiden ja rajoitteiden mukaisesti.

Polttoöljyihin verrattuna metanolin heikkoudet ovat vähäiset, mutta selkeät. Metanolin energiatiheys on huono, saman energiasisällön sisältävä metanolimäärä vaatii noin 2,5 kertaisen säiliön koon polttoöljyyn nähden. NO_x -päästörajojen alittamiseksi metanolille sopivissa moottoreissa pakokaasujen jälkikäsittelyä tarvitaan, joka lisää jälkiasennuksen / muunnoksen hintaa. Metanolimuunnos on kuitenkin huomattavasti edullisempi ratkaisu satamissa ja aluksissa kuin nesteytetyille kaasuille muutos. Fossiilinen metanoli on hieman kalliimpaa kuin perinteinen polttoöljy, yleisen valmistustavan takia metanolin hinta on suhteellisen sidoksissa maakaasun hintaan. Uusiutuvasti tuotettu metanoli on kalliimpaa, mutta sen avulla aluksen operointi saadaan periaatteessa täysin hiilineutraaliksi. Fossiilisen metanolin tuotantokapasiteetti ja -määrät ovat suhteellisen hyvät, ja mikäli meriliikenteen tulevaisuuden polttoaineeksi valitaan yksinomaan metanoli, tuotanto ehtii reagoimaan lisääntyvään kysyntään ilman pulan syntymistä. (DNV GL. 2019. 25–26.) Uusiutuvan metanolin tuotanto on vielä vähäistä, mutta puitteet tuotannon laajentamiselle ovat hyvät, sillä biosynteesin vaatiman hiilidioksidin tuotto biomateriaaleista on tehokkaampaa kuin esim. bio-kaasun tuotanto. (MefCO₂. 2018.)

3.4 Biopolttoaineet HVO & FAME

Biopolttoaineita on lukuisia, osa jo teollisessa tuotannossa ja osa vielä konseptivaiheessa. Kaupallisen meriliikenteen vaatimukset ovat kovat, ja tähän mennessä lupaavimmat suurten aluksien biopolttoainevaihtoehdot ovat LBG, biometanoli, FAME sekä HVO. LBG ja biometanoli on käsitelty aiemmissa kappaleissa ja niiden kemiallinen koostumus on identtinen fossiilisiin vastineisiinsa verrattuna. FAME ja HVO ovat uusiutuvista materiaaleista jalostettuja polttoaineita, jotka perustuvat perinteisiin polttoaineisiin vain osittain. (DNV. 2020.)

FAME (rasvahappometyyliesteri) on kevyesti jalostettu biopolttoaine, joka valmistetaan esim. kasviöljystä tai eläinrasvasta ja metanolista. Jalostustapansa takia vain FAME:a voidaan virallisesti kutsua biodieseliksi, sillä sen kemiallinen rakenne vastaa lähimmiten fossiilista dieseliä eri biopolttoaineista. Perinteiseen dieseliin verrattuna FAME:n setaaniluku on korkeampi, se syttyy moottorissa hieman hitaammin, mutta toimii fossiilista dieseliä tehokkaammin moottorien voitelussa ja vähentää kulumista liikkuvissa osissa. FAME palaa myös perinteistä dieseliä puhtaammin kevyissä polttomoottoreissa, vähentäen syntyvää savua, karstaa sekä pahoja haluja.

FAME:n heikkoudet perustuvat monet polttoaineen suhteellisen kevyeen jalostukseen ja sen sisältämiin rasvahappoihin. Fossiiliseen dieseliin verrattuna FAME:n energiasisältö on huonompi suuremmasta happisisällöstä johtuen, joten sitä ei voida käyttää suoraan perinteisen polttoaineen korvaajana tekemättä muutoksia moottoreihin, FAME:a voidaan kuitenkin sekoittaa fossiilisten polttoaineiden sekaan ilman muutoksia pienten päästönvähennyksien saavuttamiseksi. Pelkän FAME:n käytössä polttoaineen lievästi hapen kemiallinen sisältö aiheuttaa pitkällä aikavälillä korroosiota metalliosiin, jotka ovat kosketuksissa sen kanssa ja aiheuttavat toimintahäiriöitä herkissä osissa ja laitteissa, kuten pumpuissa, venttiileissä, männänrenkaissa ja polttoainesuuttimissa. Tämän takia FAME:n sekaan täytyy lisätä korroosionestoaineita tai sekaan sekoitetaan reilusti muita polttoaineita.

FAME:n varastoinnissa tulee ottaa myös huomioon useita seikkoja kevytjalostetun orgaanisen sisällön takia. Korkeamman happisisällön takia polttoaine voi reagoida herkemmin hapen kanssa, kiihdyttäen polttoaineen pilaantumista. Pilaantumista voidaan estää polttoaineen sekaan laitettavilla lisäaineilla. Biodiesel FAME on myös hygroskooppista, joten siihen imeytyy kosteutta, vaikka se ei sekoitukaan veteen sellaisenaan. Veden pääseminen FAME:n sekaan ja kosteuden imeytyminen polttoaineeseen nopeuttaa pilaantumista, sillä veden mukana tulevat epäpuhtaudet luovat ja kiihdyttävät mikrobikasvua bioperäisessä polttoaineessa ja siten heikentävät FAME:n toimivuutta polttoaineena. FAME geeliiytyy (saostuu) fossiilista dieseliä herkemmin, ja polttoaineen kontaminoituminen kosteudella tai bakteerikasvustolla voimistaa geeliiytymistä entisestään. Toisin kuin fossiilinen diesel, biodieseliä ei vielä voida valmistaa varsinaisilla

kesä- ja talvilaaduilla, mutta saostumispiisteeseen vaikuttaa raaka-aineena käytetyt öljyt ja niiden vaihtelevat esterit. Pääasiassa biodieselin geelityymistä ehkäistään sekaan laitettavilla saostumisenestoaineilla. (IEA Bioenergy. 2017. 40–42.)

HVO eli vetykäsittely kasviöljy, on biopolttoaine, joka valmistetaan vastaavista biomateriaaleista kuin FAME, mutta esteröinnin sijaan HVO:ta tuotetaan biomateriaalien vetykäsittelyn avulla. Lopputuloksena on FAME:a kehittyneempi ja polttoaineominaisuuksiltaan parempi uusiutuva diesel. Valmistustapa erottaa myös esteröidyn FAME:n biodieseliksi ja vetykäsittelyä HVO:ta nimitetään pääasiassa uusiutuvaksi dieseliksi. HVO on suunniteltu toimimaan suoraan dieselin korvaajana, eikä vaadi käytännössä mitään muutoksia varastoinnin, kuljetuksen tai moottorien osalta. HVO:n tuotantoprosessi on yleisesti ottaen kalliimpi kuin FAME:n, joka heijastuu polttoaineen hintaan. HVO on vain hieman kalliimpaa kuin fossiilinen diesel, joka on kuitenkin huomattavasti kalliimpaa kuin raskas polttoöljy. Eroavan tuotantoprosessin takia HVO ei sisällä happea, joka aiheuttaa FAME:ssa säilytysongelmia ja huomattavasti lyhyemmän käyttöiän. HVO:n energiatiheys ja setaaniluku vastaavat melkein fossiilista dieseliä ja polttoainetaloudellisuus on huomattavasti FAME:a parempi.

HVO:n kelpoisuus fossiilisen dieselin suoraan korvaukseen on johtanut hyvään suosioon merellä ja varsinkin maalla. Siksi HVO:n tuotanto on maailmanlaajuisesti jo täydellä teollisella tasolla ja siten on kokonaisuudessaan yksinkertaisimpia ratkaisuja meriliikenteen polttoainekysymykseen. Raskailla polttoöljyillä kulkevat alukset vaativat kuitenkin hieman muutoksia moottoreihin vaihtaessa (uusiutuvaan) dieseliin, sillä raskas polttoöljy on samassa lämpötilassa huomattavasti dieseliä paksumpaa, ja siksi polttoöljy vaatii kuumennuksen ennen moottoriin syöttämistä viskositeetin madaltamiseksi. Matalaviskoosempaa polttoainetta käyttäessä moottorin polttoainetekniikka voidaan yksinkertaistaa useissa tapauksissa. Biopolttoaineet vaativat kuitenkin pakokaasujen jälkikäsittelyä. Sattamatoiminnan kannalta HVO ei välttämättä vaadi minkäänlaisia muutoksia infrastruktuuriin tai bunkrauslaitteistoon. (IEA Bioenergy. 2017. 44–46.) Biopolttoaineiden käsittely perustuu öljypohjaisten ja jalostettujen tuotteiden standardien piiriin, ja toiminnan tulee noudattaa standardeissa asetettuja spesifikaatioita.

Biopolttoaineiden valmistuksessa käytettyyn biomateriaaliin on kasvaessaan sitoutunut hiilidioksidi, joten biopolttoaineiden polttamisessa syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei katsota hiilidioksidin lisäämiseksi ilmakehään elinkaariajattelulla. Tämän takia biopolttoaineita pidetään hiilineutraaleina, vaikka valmistuksessa ja polttamisessa syntyisikin CO₂-päästöjä. Pelkkiä pakokaasujen hiilidioksidipäästöjä tarkastellen biopolttoaineet FAME ja HVO päästävät 19–88 % vähemmän CO₂-päästöjä kuin vastaavissa ratkaisuissa käytetty raskas polttoöljy. Biopolttoaineiden valmistuksessa käytetyt raakamateriaalit vaikuttavat reilusti CO₂-päästöjen kokonaismäärään, varsinkin FAME:n tuotannossa. HVO:n käytöllä saavutetaan FAME:a suuremmat hiilidioksidipäästövähennykset, noin 50 % dieseliin verrattuna. FAME:n matala energiasisältö ja polttoaineen sisältämä happi laskee mahdollisuuksia suurimpiin päästövähennyksiin, ja pelkän FAME:n käytöllä saavutetaan vain hieman fossiilisia polttoaineita matalammat CO₂-päästöt. Kuten muissakin uusiutuvasti tuotetuissa polttoaineratkaisuissa, pakokaasut sisältävät reilusti fossiilisia polttoaineita vähemmän rikin oksidipäästöjä. HVO:n käyttö laskee pakokaasun typen oksideja keskimäärin 10 %, ja siten vaatii pakokaasun jälkikäsitteilyä tai takaisinkierrätystä IMO:n Tier 3 -asetusten saavuttamiseksi. Pelkän FAME:n käyttö dieselmoottorissa korottaa typen oksidien määrää pakokaasupäästöissä noin 10 % fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna, joten sen käyttö vaatii optimoidun pakokaasun takaisinkierrätyksen tai tehokkaan pakokaasujen jälkikäsitteilyn. FAME:n pienhiukkaspäästöjen määrät vaihtelevat hieman tuotannossa käytettyjen raakamateriaalien mukaan, mutta FAME:n sekä HVO:n pienhiukkaspäästöjen määrät ovat fossiilisia polttoaineita matalampia ja hyväksyttävällä tasolla. (DNV GL. 2019. 27–29.)

4 MUITA PÄÄSTÖNVÄHENNYSMENETELMIÄ

Edeltävissä kappaleissa käsitellyt päästöjen vähennysmenetelmät perustuvat vähäpäästöisempien polttoaineiden käyttämiseen nykyisissä aluksissa ja niiden polttomootoreissa. Tässä osiossa käsitellään erilaisia tapoja päästöjen vähennykseen, jotka eivät perustu eri polttoaineisiin, kuten perinteisten polttomootorien käyttämät päästönvähennysratkaisut tai vaihtoehtoiset moottoriratkaisut ja niiden mahdolliset vaatimat muutokset satamainfrastruktuuriin.

Polttomootorien pakokaasujen jälkikäsitteilyn käyttö on tämänhetkisillä polttoöljyillä välttämätöntä, mutta vaihtoehtoisien polttoaineiden käytössä eri päästöjen

tyypit vaihtelevat ja vaativat vaihtelevasti pakokaasujen jälkikäsittelyä päästörajojen alittamiseksi. Jotkin polttoainetyypit (esim. LNG) eivät välttämättä vaadi ollenkaan pakokaasujen jälkikäsittelyä päästörajojen alittamiseksi, mutta päästölaitteita asentamalla saadaan optimoitua moottorin tehokkuutta päästöjen kannalta optimoinnin sijaan.

4.1 Rikkipesurit

Vuonna 2020 IMO:n asettama kansainvälinen 0,5 %:n rikkiraja pakotti lähes kaikki polttoöljyllä kulkevat alukset vaihtamaan erittäin matalarikkiseen polttoöljyyn tai siirtymään pakokaasujen jälkikäsittelyn käyttöön. Aiempi yleinen rikkiraja oli 3,5 %, joka oli helpommin saavutettavissa. Rikkipäästörajoitetuilla alueilla (sulphur emission controlled area, SECA) rikkiraja oli jo aiemmin asetettu erittäin tiukkaan 0,1 %:n rajaan, johon vuoden 2020 yleinen rikkirajan muutos ei vaikuttanut. (IMO. 2020.) Tulevat hiilineutraaliustavoitteet vähentävät polttoöljyllä kulkevien alusten määrää hiljalleen, mutta osa vaihtoehtoisistakin polttoaineratkaisuista hyötyvät rikkipesureista.

Korkeamman rikkisisällön omaavan polttoöljyn pakokaasujen rikkipäästöjen laskemiseksi käytetään rikkipesureita (sulphur scrubbers), jotka kemiallisten reaktioiden avulla keräävät rikkioksidit pakokaasujen seasta ja joko keräävät saasteet talteen satamissa tyhjennettäviksi tai liuottavat ne mahdollisimman harmittomiksi ja ne lasketaan meriveteen. Rikkipesurijärjestelmiä, joissa rikkipäästöt pysyvät sisäisessä kierrossa, eikä meriveteen päästetä mitään, kutsutaan suljetun kierron pesureiksi (closed loop). Suljetun kierron pesurit käyttävät pesunesteitä ja tuottavat haitallista lietettä, joka tyhjennetään asianomaisesti satamissa. Teknisesti kevyemmät avoimen kierron rikkipesurit (open loop) perustuvat rikkipäästöjen neutralointiin ja lopulta puhdistusvesien meriveteen laskemiseen. Avoimen kierron pesurien käytölle on reilusti rajoitteita, useat maat ovat kieltäneet tai rajoittaneet niiden käyttöä aluevesillä ja varsinkin satamissa ja rannikkoalueiden välittömässä läheisyydessä. Kiellot ja rajoitteet perustuvat pesuvesien lievästi harmilliseen sisältöön ja sen ympäristövaikutuksiin. (IMO. 2020.)

Rikkipesurien toiminta perustuu pesuaineiden suihkuttamiseen pakokaasuihin, jossa rikkidioksidi reagoi vaikuttavan aineen kanssa ja muodostaa muita

yhdisteitä, jotka voidaan helpommin poistaa pakokaasuista. Avoimen kierron pesureissa käytetään merivettä, joka reagoi rikkidioksidin kanssa muodostaen rikkihappoa, joka myös neutralisoidaan lievästi emäksisellä merivedellä ja päästetään lopulta vesistöihin. Suljetun kierron pesureissa yleisimmin rikkidioksidin erottavana komponenttina käytetään natriumhydroksidia, joka muodostaa rikkidioksidin kanssa reagoiessa neutraalia natriumsulfaattia, joka varastoidaan satamatyhjennykseen asti muun käytetyn pesuaineen ja lietteen kanssa. Suuri osa pesuvedestä puhdistetaan ja kierrätetään uudelleen ja uudelleen järjestelmän läpi pienentäen pesuaineiden tilavaatimuksia. Rajoitteiden takia saatavilla on myös yleistyvä hybridikierron pesureita, jotka toimivat pääasiassa avoimella kierrolla, mutta voivat toimia väliaikaisesti myös suljetulla kierrolla esim. satamakohtaisten rajoitteiden kiertämiseksi tai alueilla, joissa meriveden emäksisyys ei ole riittävä tehokkaaseen neutralointiin. (Marine Insight. 2021a.)

Yhä yleisemmät suljetun kierron pesurit käyttävät pesuaineita, pesuvesiä sekä tuottavat jätevesiä ja lietettä (scrubber sludge), jotka tuovat luonnollisesti lisätoivia satamissa. Suljetun kierron järjestelmät hyödyntävät ”pesuaineena” yleisimmin natriumhydroksidia (lipeä), joka on erittäin vahva emäs. Natriumhydroksidi toimitetaan aluksiin yleensä kiinteässä muodossa, jolloin on huomioitava sen hygroskooppisuus (imee kosteutta) ja vahvat emäksiset ominaisuudet, kuten kevyempien metallien syövyttävyyden. Rikkipesureissa natriumhydroksidia käytetään makean veden kanssa vesiliuoksena. Tarvittava makea vesi täytetään joko satamissa tankkeihin, ja/tai sitä tuotetaan merivedestä makean veden generaattoreilla.

Suljetun kierron pesureiden käyttö tuottaa jätevesiä sekä lietettä. Syntyvä jätevesi ei ole kelpoista vesistöön päästettäväksi, mutta ei kuitenkaan liian haitallista vaatiakseen erillistä jätekäsittelyä, joten se varastoidaan muun aluksella syntyvän jäteveden kanssa jätevesisäiliöissä ja tyhjennetään satamissa. Syntyvä liete on kuitenkin haitallista, ja vaatii asianomaista käsittelyä aluksella ja satamissa. Liete ei koostu varsinaisesta pesuritoiminnasta, vaan pesuvesiin tarttuvasta noesta ja pienhiukkasista, jotka täytyy suodattaa erikseen pesuvesistä. Liete sisältää pääasiassa nokea, erilaisia palamisreaktion pienhiukkasia, öljyisiä päästöjä ja pesuriprosessin vähäisiä sivutuotteita, kuten hyytymis- ja sakkautumisaineita, ja sulfaatteja ja suoloja pesuaineena käytetystä natriumhydroksidista. (Alfa Laval. 2019.) Liete varastoidaan aluksilla omissa säiliöissä ja

käsitellään satamissa erillään muusta öljyisestä jätteestä (sludge oil). Pesuriliete on ongelmajätettä, eikä sitä voida käsitellä satamissa. Loppusijoitus lieteelle on yleensä jätealtaat, tai liete kuivatetaan ja käytetään hyödyksi pohjustusmateriaalina esim. asfalttiteiden rakennuksessa. Lietettä ei voida kierrättää kokonaan, jäämät joko hyödynnetään rakentamisessa tai sijoitetaan jätekeskuksiin. (VTT. 2016. 13–15.)

Useimmat vaihtoehtoiset polttoaineratkaisut nauttivat vähäisistä rikkipäästöistä, joten rikkipesureiden merkitys tulee laskemaan huomattavasti meriliikenteen siirtyessä kohti uusiutuvia polttoaineita ja hiilineutraaliutta. Pienemmällä intensiteetillä pesureiden käyttö voi poistaa lähestulkoon kaikki rikkipäästöt vaihtoehtoisten polttoaineiden pakokaasuista, ja pesureita voidaan mahdollisesti soveltaa myös enemmän noen ja pienhiukkasten talteenottoon. Tämä tuottaisi enemmän hankalasti käsiteltävää jätettä aluksista, eikä esim. pienhiukkasten erilliseen vähentämiseen ole vielä tarvetta, varsinkaan vaihtoehtoisten polttoaineiden kanssa.

4.2 SCR & Urea

Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (selective catalytic reduction), on kemiallinen tekniikka, jolla saadaan vähennettyä pakokaasujen typen oksidipäästöjä (NO_x). Typpipäästöjen hallitseminen ja alentaminen tuli ajankohtaiseksi vuonna 2008, jolloin IMO asetti voimaan kolmivaiheisen päästösuunnitelman aluksista syntyvien NO_x-päästöjen vähentämiseksi. (Katso sivu 12) SCR:n toiminta perustuu urea-vesi-sekoituksen sumuttamiseen pakokaasujärjestelmään ja urea reagoi pakoputkiston katalyyttipinnoilla pakokaasujen sisältämien typen oksidien kanssa ja pelkistää typen oksidit vedeksi ja ympäristöystävälliseksi vedeksi. Urealiuosta kuluu noin 5–8 % polttoaineen kulutuksesta, joten aluksissa mukana kulkevan liuoksen määrä on vähäinen polttoaineeseen verrattuna, mutta säiliöiden koosta riippuen ureatankkausta ei vaadita välttämättä jokaisen polttoainetankkauksen yhteydessä. (Selective Catalytic Reduction. s.a.)

Tavalliset kaupalliset urealiuokset ovat yleisesti noin 32 % ureaa ja loput ionipuhdistettua vettä, mutta raskaisiin dieselmootoreihin (alukset yms.) suunniteltu urealiuos on noin 40 % ureaa. Raskaisiin moottoreihin suunniteltu urealiuos jäätyy jo lämpötilassa 0°C, eikä sitä voida hyödyntää kuin nestemäisessä

muodossa, joten kylmissä olosuhteissa urealiuos täytyy varastoida lämmite-tyissä säiliöissä tai lämpimissä tiloissa. Säilytyslämpötila vaikuttaa myös urea-liuoksen käyttöikäen, parhaimmillaan urealiuos säilyy hyvänä noin 3 vuotta, jos keskimääräinen säilytyslämpötila pysyy välillä 0°–25°C. Mikäli keskimääräinen säilytyslämpötila on suurempi, käyttöikä voi laskea jopa puoleen vuoteen. Jatkuvasti yli 35°C lämpötiloissa säilytettävä urealiuos tulisi tarkistaa aina ennen täydennystä, sillä korkea lämpötila tekee urealiuoksen koostumuksesta epäva-kaata. Urealiuoksen varastoinnissa täytyy myös huomioida sen korroosiota ai-heuttavat ominaisuudet. Urealiuoksen varastointiin käytettävät säiliöt voidaan valmistaa esim. vahvoista muoveista, ja terässäiliöt ovat vuorattava tai pinnoi-tettava korroosiota vastustavilla materiaaleilla. Urea aiheuttaa myös korroosiota alumiinissa, kuparissa ja sen seosmetalleissa, joten urean käsittelyyn käytettä-vät putkistot ja venttiilit ovat valmistettava esim. ruostumattomasta teräksestä tai muoveista. Urealiuos ei ole kuitenkaan välittömästi haitallista tai vaarallista ihmiselle pintakosketuksessa (ärsyttävä vaikutus), eikä sen käsittelyyn vaadita vaarallisten aineiden käsittelyn vaatimia kattavampia turvavarusteita tai koulu-tusta. Jos urealiuos altistuu erittäin kuumille lämpötiloille, siitä voi erottua am-moniakkikaasua, joka on vaarallista hengitettynä ja voi aiheuttaa tulipalovaaraa. (Seacrestor. s.a.)

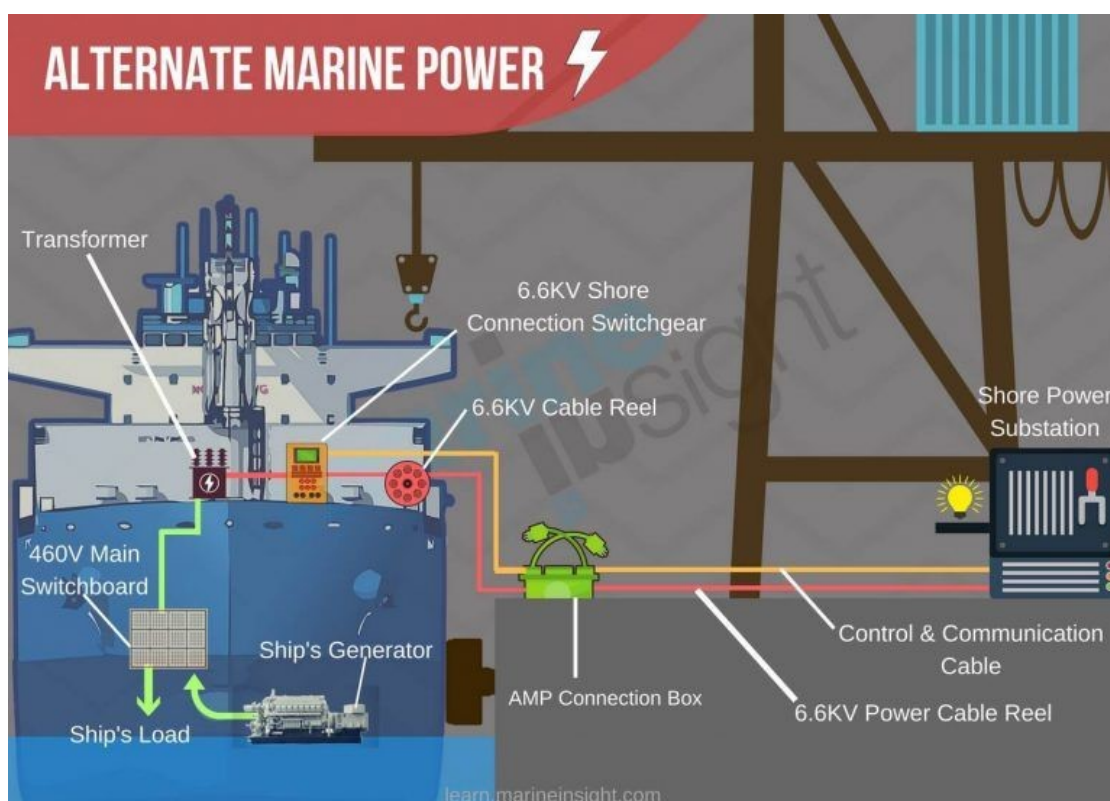
Vaikka fossiilisten polttoaineiden tie meriliikenteen käytössä on todennäköisesti päättymässä, mutta useat vaihtoehtoiset polttoaineratkaisut tuottavat sellaise-naan IMO:n rajat ylittäviä määriä typen oksidipäästöjä. Siksi SCR ja muut NOx -päästöjä alentavat päästönvähennysmenetelmät omaavat hyvän tulevaisuu-den, sillä niiden kehitys on jatkuvaa eivätkä kyseisten menetelmien markkinat tule hiljenemään näkyvän tulevaisuuden aikana.

4.3 Maasähkö

Maasähkön (cold ironing / alternative maritime power) idea on yhdistää sata-missa olevat alukset satamien sähköverkkoon, ettei alusten tarvitse pitää polt-tomootoreita käynnissä, vähentäen aluksista syntyviä pakokaasupäästöjä. Kaikki kaupalliset alukset tarvitsevat satamassa ollessa sähkövirtaa erilaisiin tarpeisiin, kuten pumput, valaistus, lämmitys, jäähdytys ja kommunikointilait-teet. Kytkemällä alus ulkoiseen sähköverkkoon, sähköä ei tarvitse tuottaa aluk-sen omilla generaattoreilla tai apukoneilla. Ulkoiseen sähköverkkoon kytkettynä

omat moottorit voidaan sammuttaa ja vähentää syntyviä pakokaasupäästöjä sataprosenttisesti. Päästöjen vähentäminen satamissa on erityisen merkityksellistä, sillä satama-alueilla syntyvät ilmansaasteet vaikuttavat rannikkoalueiden luontoon ja läheisien asuin- ja kaupunkialueiden ilmanlaatuun haitallisesti. Maasähkön hyödyntämisellä vähennetään myös alusten polttoaineen kulutusta ja toiminnan hiilijalanjälkeä.

Alusten vaihtelevien virtatarpeiden takia satamien käyttämät tavalliset pienjänniteverkot eivät riitä. Suuremmat kaupalliset rahtialukset käyttävät yleisimmin joko 3,3kV tai 6,6kV korkeajännitesähköjärjestelmiä. Useat risteilyalukset voivat käyttää runsaan energiankulutuksensa takia jopa 10kV sähköjärjestelmiä. (Marine Insight. 2021c.) Kaupallisten alusten maasähkön hyödyntämiseen on käytössä standardi IEC 80005-1, joka määrittelee mm. maasähkön syöttöjännitteen 6,6kV ja vaadittavat laitteistot ja parametrit maasähkön liitännöiden asentamiselle ja käyttämiselle aluksissa ja satamissa. Standardin mukaisesti suurin osa tarvittavista maasähkön komponenteista on asennettava aluksille, sillä tarvittavat komponentit voivat vaihdella reilusti aluksen vaatimuksista johtuen. Näin saadaan yksinkertaistettua satamien infrastruktuuritarpeita, valvonta ja säätöjen teko kohdistuu lähinnä alukselle ja yhteensopivuus on taattu samaa standardia noudattavien alusten kanssa. (Wärtsilä. 2017.)



Kuva 7. AMP-kokoonpano. (Marine Insight.)

Kuvassa 7 nähdään yleisellä tasolla maasähkön kokonaisuus aluksella ja satamassa. Sataman puolella maasähkön syöttämiseen sisältyy pääasiassa muuntaja / sähköpääkeskus, johon maan tai voimalaitoksen keski- korkeajänniteverkko on yhteydessä, sekä satamapuolen kytkintaulut ja itse liitäntäpistokkeet voimavirralle ja tiedonsiirtokaapeleille. Aluksella sijaitsee kaapelit sähkön siirtoon, sekä virran vastaanoton kytkinlaitteet sekä muuntajat, joilla maalta syötetty sähkö saadaan aluksen eri laitteiden hyödyntämään muotoon.

Maalle asennettava muuntajakeskus asennetaan maan keskijännitteiseen sähköverkkoon, ja tarvittaessa voimalinjat ovat vedettävä erikseen satama-alueelle, jos satamassa on käytössä vain tavallinen pienjänniteverkko. Sataman puolelta voidaan seurata aluksen virran vastaanottoa sekä mitata sitä laskutusta varten. Alusten virrankulutuksesta ja nykyajan muutosherkistä sähkön hinnoista johtuen maasähkön käyttö satamissa voi olla reilustikin kalliimpaa kuin perinteinen apukoneiden käyttäminen sähköntuotantoon. Maasähkön ensisijaisena tavoitteena on kuitenkin päästöjen vähennys, eikä polttoaineen säästäminen. (Wärtsilä. 2021.)

Maasähköinfrastruktuurin asentaminen on suurehko investointi satamissa sekä aluksissa, mutta se vähentää satamien yhteydessä syntyviä pakokaasupäästöjä tehokkaasti, ja siinäkin päästöjen määrää kokonaisvaltaisesti, eikä vain tiettyjä päästötyyppejä. Maasähkön vastaanottolaitteiston jälkiasennus aluksiin on kuitenkin helposti mahdollista, muttei kovin edullista kokonaispäästövähennyksiin nähden. Voimavirran käsittely satama-alueilla vaatii asianomaisen koulutuksen työntekijöille ja maanpäälliset muuntajat ja sähkökeskukset vaativat turva-alueet. Maasähkön päästöedut ovat saavutettavissa kuitenkin vain satamaan ankkuroituneena, joten hyöty riippuu laiturissa vietetystä ajasta. Vilkaammissa satamissa alukset voivat joutua odottamaan pitkiä aikoja myös ulkoankkurissa, johon ei ole saatavilla maasähköä. Esim. risteilyalukset, jotka käyttävät reilusti sähköä sekä viettävät reilusti aikaa laitureissa saavuttavat suurimmat päästövähennykset maasähkön käyttämisestä.

4.4 Hybridi- ja sähkötoimiset alukset

Sähkötoimiset alukset mahdollistavat alusten toiminnan niin päästöttömäksi kuin itse käytetty sähkö, mutta rajoittavin tekijä on edelleen akkujen kapasiteetti. Akut ovat vieläkin energiasisältönsä nähden suuria ja painavia, joka vaikuttaa huomattavasti aluksissa, sillä etäisyydet, massat ja virrankulutus ovat omassa luokassaan esim. henkilöautoihin verrattuna. Hybridialukset, joissa on akustot ja sähkömoottorit, sekä perinteiset polttomoottorit, ovat hyviä kompromisseja täyssähköisten ja perinteisten alusten välillä. Hybridialus voi käyttää tavanomaisia polttoaineita suurimman osan ajasta, ja vaihtaa päästöttömään sähkövoimaan esim. satamien läheisyydessä ja rannikkoalueilla, joissa päästöttömyys ja hiljaisempi operointi on haluttavaa. Hybridialuksien heikkoutena on kuitenkin lisääntynyt monimutkaisuus ja siten ylläpitokulut ovat suurempia ja henkilökunnan osaamisen täytyy olla laajempaa. Hybridilaitteistojen jälkiasennus aluksiin on myös kallista, työlästä, ja useissa tapauksissa taloudellisesti täysin kannattamatonta. Jälkiasennukset voivat usein myös pienentää aluksien kuljetuskapasiteettia, sillä akustot ovat suuria, eikä aluksiin ole tietenkään alun perin suunniteltu akkujen jälkiasennusta.

Täyssähköisiä aluksia on vielä hyvin vähän, mutta ne ovat hiljalleen yleistymässä. Akustojen rajoittuneisuuden takia sähkötoimisia aluksia löytyy tällä hetkellä vain parhaiten soveltuvilta meriliikenteen alueilta, kuten lossit, lautat ja hinaaja-alukset. Näissä käyttömuodoissa alukset viettävät suhteellisen paljon aikaa laiturissa liikenteessä käytettyyn aikaan verrattuna, ovat myös usein laiturissa ja alukset ovat suhteellisen kevyitä, joten akustojen ei tarvitse olla suuria. (DNV GL. 2019. 41–44.)

Meriliikenteessä sähkövoiman haasteena on myös suurten akkujen latausaika, sillä valtamerillä ei ole latauspisteitä, eikä ylimääräisien satamapysähdyksien teko akkujen latausta varten ole kannattavaa liiketoiminnallisesti. Suurien akkukapasiteettien lataukseen vaaditaan tehokkaat laurit, ettei alusten satamassa viettämä aika veny pelkän latauksen takia. Laurit asennetaan pääasiallisesti satamiin, jolloin jokaisella aluksella ei tarvitse olla kuin kytkennät, joten tarvittavien laurien määrä vähenee, sekä mahdolliset yhteensopivuuksien ongelmat pienenevät. Toisin kuin maasähkön kanssa, hybridi- ja täyssähköalusten

latauslaitteistoa ei ole vielä standardisoitu, koska aluksia on vielä hyvin harvassa ja teknologia on nopeasti muuttuvaa.

Kaupalliseen alustoimintaan latausinfrastruktuurin suunnittelu vaatii ehdottomasti panostusta mm. kestävyYTEEN, siksi esille nouseva lataustekniikka on enimmäkseen langatonta, sen kiistämättömien etujen takia. Langaton lataustekniikka mahdollistaa helpommin täysin automaattisen latauksen alusta loppuun, eikä langattomuuden takia ole liittimiä tai pistokkeita, jotka kuluisivat vuosien aikana käytössä. Langattomassa latauksessa etuna on myös nopea aloitus, sillä fyysisten kytkentöjen puuttuessa lataus voidaan aloittaa heti kun alus on latauspisteen läheisyydessä, jo ennen laituriin köyttämistä. Perinteisesti kytkentöjen kautta alusten lataaminen soveltuu kuitenkin hyvin aluksille, jotka viettävät pidempiä aikoja satamassa eivätkä lataa usein, joten latausliitännöiden kuluminen on vähäisempää. Langallisen latauksen kanssa tulee ottaa huomioon myös hyvin läheisen meriveden korrosiiviset ominaisuudet, jotka voivat aiheuttaa liitännöiden heikkenevää johtavuutta. Langallinen lataus vaatii huomattavasti yksinkertaisempaa tekniikkaa, mutta vaatii jokaisen latauksen aloituksen ja lopetuksen yhteydessä toimenpiteitä aluksen miehistöltä ja satamaoperaattoreilta. (Marine Vessel charging systems. s.a.)

Sähkötoimisiin aluksiin ja niihin liittyvään infrastruktuuriin investointi on vielä hyvin kallista, eikä sähköön käyttö ”polttoaineena” ole yhtä edullista kuin perinteiset polttoöljyt. Vaihtoehtoiset polttoaineet ovat kuitenkin huomattavasti raskasta polttoöljyä kalliimpia, joten erotus pienenee selkeästi, sillä päästösyistä raskas polttoöljy tulee poistumaan vähitellen alusten käytöstä. Sähkötoimiset alukset ja niiden latausinfrastruktuuri on vielä täysin kehitysvaiheessa, ja kaikki sähkötoimiset alukset ovat lähinnä prototyyppinä käytännön testivaiheissa. Jatkuvasti kehittyvän akku- ja latausinfrastruktuurin ja sen standardoinnin puuttumisen takia laaja-alaisen investointien teko on riskialtista ja kallista. Sähköön vaihteleva ja korkea hinta heikentää myös sähkötoimisten alusten kilpailukykyä, mutta sähköä on aina saatavilla, eikä sen keskihinta pysy pitkiä aikoja korkealla, ilman muutoksia koko maailmantaloudessa.

Sähkötoimisten alusten ja hybridialusten suurin etu on sähkövoimalla kulkiessa täysi päästöttömyys ja suhteellisen hiljainen operointi. Alusta lähtien sähkötoimiseksi suunnitellut alukset voivat olla hyvinkin tehokkaita tilankäytön kannalta,

sillä akustojen ja moottorien sijoittelu on joustavampaa kuin polttomoottoreilla. Toisin kuin perinteiset polttoainesäiliöt, akustopatterit täytyy kuitenkin asentaa tavalla, joka mahdollistaa akustojen vaihtamisen tulevaisuudessa. Sähkövoiman etuna on myös suhteellinen yksinkertaisuus polttomoottoreihin verrattuna, sähkömoottoreissa ja akustoissa on huomattavasti vähemmän liikkuvia ja kuluvia osia, joten huoltotoimenpiteet jäävät vähemmälle, eikä ylläpito ole välttämättä yhtä kallista. Sähkömoottorit ja oheislaitteet käyttävät myös huomattavasti vähemmän voiteluaineita, joka vähentää luonnollisesti voiteluaineiden (kulutustuote) tarvittavaa määrää, ja aluksilla syntyvien öljyisten jätevesien määrä vähenee.

Sähkön varastointi akustoissa on vakaampaa kuin syttyvien ja mahdollisesti paineistettujen polttoaineiden varastointi, joten polttoaine- ja kaasuvuotojen ja tulipaloriskien määrä laskee. Voimavirta tuo toki omat vaarat ja riskit, mutta sähköinfrastruktuuri sisältää huomattavasti vähemmän liikkuvia ja kuluvia osia. Suurien polttoainesäiliöiden puuttuminen on sähkövoiman eduksi myös satamissa ja lähialueilla, suurien polttoainemäärien varastoinnilla on omat riskinsä, ja säiliöt vievät reilusti tilaa. Sataman kannalta sähkövoima on infrastruktuuriltaan kevyehköä. Satamien yhdistäminen keskijänniteverkkoon ja muuntajakeskusten rakentaminen on kertaluonteinen investointi, eikä ylläpito ole kallista. Laitureihin asennettavien laturilaitteistojen kustannukset riippuvat latureiden tyypistä, kehittyneemmät langattomat laturit ovat huomattavasti kalliimpia, mutta voivat olla pitkällä aikavälillä ongelmavapaampi ratkaisu perinteisiin kytkettäviin latureihin verrattuna. (DNV GL. 2019. 41–44.)

4.5 Polttokennot

Polttokennot perustuvat sähköenergian tuottamiseen erilaisista polttoaineista sähkökemiallisen reaktion avulla. Polttoaineen sitoma kemiallinen energia muutetaan sähköenergiaksi sähkökemiallisissa hapetusreaktioissa, sivutuotteena syntyy myös ratkaisusta riippuen reilusti lämpöenergiaa. Sähköenergian tuotannossa polttokennojen hyötysuhde on parhaimmillaan noin 60 %, eli selkeästi perinteisiä dieselmoottoreita parempi. Lämpöenergian talteenotto parantaa myös tehokkuutta, se on myös helpompaa, sillä polttokennosta ei synny vastaavasti pakokaasuja, kuten polttomoottoreista. Polttokennon varsinaisen reaktion päästönä syntyy vain lämpöä sekä vettä. Pääasiallisesti polttokennojen

polttoaineena käytetään vetyä, mutta vedyn säilytyksen hankaluuden takia polttoaineeksi voidaan myös valita yhdisteitä, jotka sisältävät reilusti vetyä, kuten metanolia, etanolia tai muita hiilivetyjä. Metanoli (ja muut käytettävät yhdisteet) täytyy kuitenkin reformoida vedyksi, jota polttokenno käyttää. Polttoaineen reformointi käyttää energiaa ja ainakin metanolista reformoidessa syntyy hiilidioksidia, joten muuta kuin pelkkää vetyä käyttävät polttokennoratkaisut eivät ole hiilivapaita.

Vetypolttokennoja on kehitetty aktiivisemmin viimeiset kaksi vuosikymmentä, ja ovat vähäisesti, mutta onnistuneesti käytössä henkilöautoissa sekä jonkin verran raskaassa liikenteessä. Polttokennot ja niiden vaatima infrastruktuuri on vielä hyvin kallista, pienen kysynnän ja sarjatuotannon kannattamattomuuden takia valmistuskustannukset pysyvät korkeina. Vedyn käyttäminen suoraan polttokennoissa vaatii vedyn varastoinnille soveltuvaa infrastruktuuria, kun taas esim. metanolia polttoaineena käyttäessä polttoaineen varastointi on helpompaa, mutta vaatii reformointilaitteiston metanolin vedyksi muuntamiseen, joka tuottaa hiilidioksidia. Uusiutuvan metanolin käyttö polttokennoissa on hiilineutraalia, mutta fossiilisen metanolin reformoinnista syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat noin 70 % saman metanolimäärän polttomoottorissa synnyttävästä määrästä. Vedyn tuottaminen on myös vähäistä, ja vielä suhteellisen kallista. Vedyn varastointiin ja kuljetukseen suunniteltua infrastruktuuria on hyvin rajatusti, sillä vedyn kysyntä on teollisuuden ulkopuolella hyvin vähäistä. Tällä hetkellä vetyä tuotetaan melkein kokonaan fossiilisia polttoaineita reformoimalla, eikä kyseinen toiminta ole uusiutuvaa tai hiilineutraalia. Vetytoimisten polttokennojen hiilineutraalius saavutetaankin vain uusiutuvasti tuotetulla vedyllä. Vetyä voidaan tuottaa uusiutuvasti esim. biomassaa tai -materiaalia kaasuttamalla tai veden elektrolyysillä. Veden elektrolyysi vaatii reilusti sähköenergiaa, jonka tulisi myös olla uusiutuvasti tuotettua, jotta elektrolyysillä tuotettu vety katsottaisiin täysin uusiutuvaksi. (DNV GL. 2019. 44–46.)

Yhtenä polttokennojen haasteena on vedyn varastointi, sillä vety on kevyin kaasu, ja polttokennokäytössä sen volumetrinen energiatiheys on huono. Yleisimmin vety varastoidaan voimakkaasti paineistetuissa säiliöissä, 35–70 MPa paineissa. Vedyn kiehumispiste on erittäin alhainen (-253°C), joten vedyn varastointi nestemäisenä on huomattavasti vaativampaa kuin esim. maakaasun (kiehumispiste -162°C). Tämän takia vetyä varastoidaan nesteytettynä vain

muutamissa teknisesti haastavissa tapauksissa ja suurissa varastointi- ja tuotantolaitoksissa. Lähes kaikki puolikiinteät tai helposti siirrettävät vetysäiliöt ovat paineistettuja. Vedyn varastointi painesäiliöissä perustuu laajalti muidenkin paineistettujen kaasujen varastoinnin standardointiin ja lainsäädäntöön. (TÜV SÜD. s.a.) Vety kuitenkin eroaa useista paineistetuista kaasuista suhteessa korkeamman paineen takia, ja hapen kanssa sekoittuessa aiheuttaa herkästi syttyvän ja räjähtävän kaasuseoksen. Vetykaasuvuoto ei ole kuitenkaan haitallinen ihmisille tai ympäristölle, suljettuja tiloja lukuun ottamatta vedyn keveyden takia tukehtumisen riski on erittäin matala. Vaikka vety ei ole varsinainen kasvihuonekaasu, se vaikuttaa ilmakehässä metaanin ja otsonin leviämiseen, joten vety koetaan epäsuoraksi kasvihuonekaasuksi. (NRDC. 2021.)

Satamissa tarvittu infrastruktuuri vedyn käytössä toimii osittain kuin nestekaasujen laitteisto, sillä painetiiviys ja puhtaus ovat erittäin tärkeitä, mutta vedyn tapauksessa lämpötilat pysyvät ympäröivän lämpötilan lähellä, joten kryogeenisia laitteistoja ei tarvita. Paineistetun vedyn varastoinnin tilantarve on kuitenkin suuri, eikä paineistettuja vetysäiliöitä valmisteta kovin suurina, suhteessa aluksien tarvitsemaan määrään. Paineistetut säiliöt vievät reilusti tilaa oheislaitteen sekä turva-alueineen, mutta tilankäytöltä tehokkaammat nestemäisen vedyn varastointisäiliöt ovat kalliita investointeja ja vaativat jatkuvaa seurantaa. Laitteiston monimutkaisuuden kannalta vetytankkauslaitteisto ei ole kallista, mutta tällä hetkellä tankkauslaitteistojen kysyntä on pientä, joten laitteistojen hinnat pysyvät jokseenkin korkeina, sillä niiden teolliselle sarjatuotannolle ei ole tarvetta. Vetypolttokennotekniikan hyödyntäminen ja kehittäminen on hyvin riippuvainen muiden teknologian kehittymisestä saavuttaakseen laajan kaupallistumisen. Uusiutuvan metanolin tuotannon yleistyessä metanolipolttokennojen on helpompi yleistyä, ja vetypolttokennojen yleistyessä esim. henkilöautoissa, sarjatuotannon avulla polttokennojen kustannukset pystytään painamaan matalammiksi, jolloin vetyinfrastruktuuri alkaa laajenemaan sekä halpenee. (DNV GL. 2019. 45–46.)

4.6 Ydinvoima

Ydinvoima on objektiivisesti tehokkain energian tuotantomuoto, nykypäivänäkin, mutta aihe on hyvin politisoitunut. Ydinvoiman poliittisesti hankala asema johtuu pääasiassa käytetyn ydinpolttoaineen voimakkaasti haitallisesta

radioaktiivisuudesta sekä ydinonnettomuuksista, jotka voivat tapahtua voima-loissa syntyvistä vahingoista, kuten vuoden 1986 Tšernobylin ja 2011 Fukushi-man onnettomuudet. Muihin energian tuotantomuotoihin verrattuna ydinvoima on kuitenkin hyvin turvallista ja onnettomuuksien määrä on pieni, varsinkin ener-gian tuotannon määrään suhteutettuna. (World Nuclear Association. 2022.)

Poliittisista haasteista huolimatta ydinvoiman suurin haaste on yleisesti ottaen sen vaatimat massiiviset investoinnit. Ydinvoimalaitosten rakennushankkeet ovat tähän mennessä olleet erittäin kalliita investointeja, joiden valmistuminen suunnittelupöydältä on voinut kestää jopa kymmenen vuotta. Ydinreaktoreita on asennettu myös alusten voimanlähteiksi, mutta vain erityisen vaativiin ja pitkä-aikaisiin tehtäviin, kuten sukellusveneisiin, lentotukialuksiin ja arktisten alueiden tukialuksiin. Näillä aluksilla on usein tarve pysyä merellä tai täydennyksien ulot-tumattomissa hyvinkin pitkiä aikoja, joten perinteiset polttomootorit vaatisivat kohtuuttoman suuria polttoainesäiliöitä pitääkseen toimintasäteen tarkoituksen-mukaisena. Kuten maalle rakennetut ydinvoimalat, ydinkäyttöiset alukset ovat suuria investointeja, jotka suunnitellaan ydinkäyttöisiksi aivan alusta. Monimut-kaisen reaktorin ja sen ylläpidon takia ydinkäyttöiset alukset ovat kalliita ope-rointikustannuksiltaan, ja siksi lähes kaikki ydinkäyttöiset alukset ovat sotilas-aluksia. (World Nuclear Association. 2021.)

Modernien pienten modulaaristen reaktorien (small modular reactor SMR) ke-hitys on lupaavaa, ja modulaarisia reaktoreita olisi mahdollista valmistaa myös liikkuviin kohteisiin, kuten aluksiin. Modulaariset reaktorit parantaisivat ydinvoi-man kustannustehokkuutta ja madaltaisivat kynnystä ydinvoiman käyttöönot-toon. SMR-mallisten reaktorien tavoitteleva edullisuus saavutettaisiin sarjatuotannolla, sillä useamman samanlaisen reaktorin valmistuksella valmistuskus-tannukset saataisiin matalammiksi. Useimmat prototyyppivaiheiden jälkeen val-mistetut ydinkäyttöiset alukset käyttävät oman aikansa modulaarisia reaktoreita, mutta pienten valmistusmäärien ja sotilasaluksien luonteen takia hank-keet ovat olleet hyvin kalliita. Siviilikäytössä pienet modulaariset reaktorit mah-dollistaisivat ydinvoiman saavutettavuuden keskisuurille ja suurille kaupallisille aluksille, mutta pääasiallisesti vain uusiin aluksiin, jotka suunniteltaisiin lähtö-kohtaisesti ydinkäyttöiseksi. Alusten jälkiasennus ydinvoimalle on mahdollista, mutta useissa tapauksissa todennäköisesti kannattamatonta laajan purku- ja asennusprosessin takia.

Modulaariset reaktorit ovat lähes toimintavalmiita kokonaisuuksia, jotka asennettaisiin kokonaisina voimaloihin tai aluksiin, nopeuttaen ja yksinkertaistaen valmistumista. Valmistumisnopeuden parantamisen lisäksi modulaariset reaktorit olisivat standardoituja kokonaisuuksia, joka helpottaisi ja nopeuttaisi myös projektien teknillisiä ja säädännöllisiä vaiheita. Kaikki modernit SMR:t on suunniteltu turvallisiksi ja itsenäisiksi kokonaisuuksiksi, jotka toimivat automaattisesti ja pystyvät hallitsemaan aktiivisen ytimen reaktorin toimintaa uhkaavissa tilanteissa. (US Department of Energy. s.a.)

Aluskäytössä modulaarisilla reaktoreilla saavutettaisiin vähintään 5 vuoden tankkausväli, ydinpolttoaineen rikastusasteesta riippuen. Kuten sotilasaluksilla, tankkausväli voitaisiin saada jopa 15 tai 20 vuoteen, mutta niin pitkille yhtäjaksoisille toiminta-ajoille ei ole tarvetta kaupallisissa aluksissa, sillä IMO:n SOLAS-sopimus määrää vetoisuudeltaan yli 500:n kaupallisten alusten kuivatelakoinnin kahdesti viiden vuoden aikana. (Marine Insight. 2021b). Alusten ydinpolttoaineen täyttö ja käytetyn ydinmateriaalin poistaminen on kuivatelakalla tehtävä prosessi, joka sisältyisi SOLAS-sopimuksen mukaisesti säännöllisiin telakointeihin.

Pienetkin ydinreaktorit ovat tuotantoteholtaan huomattavasti dieselmoottoareita parempia, ja suuriin moottoreihin yhdistettyinä, ydinkäyttöisten alusten moottoriteho ylittäisi helposti rungon tekniset rajat. On mahdollista, että ydinkäyttöisillä aluksilla otettaisiin käyttöön tavanomaisia dieselaluksia korkeampi kulkunopeus, sillä energiankulutuksen nousu ydinkäyttöisenä ei ole kovinkaan merkityksellinen, päästöjen pysyessä samana. Matka-aikojen lyheneminen olisi hyvin merkityksellinen muutos maailmankaupassa. Ydinreaktorit tuottavat energiaa yli aluksen liikuttamisen tarpeiden, joten ydinvoimaa voidaan hyödyntää myös muiden aluksen tarpeiden täyttämiseen, kuten valaistus ja muut sähkön tarpeet. Risteilyalukset hyötyisivät myös ydinvoiman käyttöönotosta, sillä matkojen pituuteen ja aluksen kokoon nähden risteilyalukset kuluttavat huomattavasti enemmän energiaa kuin mitkään muut alukset. Ydinkäyttöisenä risteilyaluksien ei tarvitsisi erillisiä apukoneita sähköntuotantoon aluksen propulsioon liittymättömiin tarpeisiin. Dieselapukoneita on silti varattava hätätiloissa käytettäväksi. Satamatoiminnan kannalta ydinvoima yksinkertaistaa satamakäyntejä, sillä aluksia ei tarvitse tankata. Tavallisella satamakäynnillä ei tarvita säiliöautoja tai

muutakaan tankkausinfrastruktuuria. Ydinalukset eivät myöskään tarvitse kyt-kentää maasähköön. Ydinkäyttöiset alukset pystyvät pysymään laiturissa ilman minkäänlaisia pakokaasupäästöjä, vaikka alus käyttäisikin mahdollisia omia nostureita tai pumppuja lastin siirtoon. Tämä mahdollistaa myös lastin purkua tilanteissa, joissa sataman purkukalustoa ei ole käytettävissä. Kun ydinkäyttöinen alus vaatii ydinpolttoaineen täydennystä, tarvitaan myös käytetyn voimakkaasti radioaktiivisen materiaalin poisto, joka on vaativa prosessi. Harvoin tapahtuvan täydennyksen ja sen haasteiden takia ydinreaktorin täydennys suoritetaan kuivatelakalla alusten säännöllisen huollon ja korjausten yhteydessä. (World Nuclear Association. 2021.)

YHTEENVETO

Kiristyvien päästörajoitusten takia meriliikenteessä on alkamassa muutos, joka vaikuttaa pysyvästi meriliikenteen käyttämiin polttoaineisiin ja moottoriratkaisuihin. Tämän tutkimuksen päätavoitteena oli käsitellä ja tarkastella meriliikenteen päästövähennysmenetelmiä satamien näkökulmasta, sillä eri menetelmillä on useimmiten vaikutuksia myös satamien infrastruktuurin, turvallisuustoiminnan ja satamissa syntyvien päästöjen kannalta. Tutkimuksessa ei ole juurikaan vastakkainasettelua eri menetelmien välillä, eikä niiden vertailua toisiinsa, koska eri menetelmät voivat erota ominaisuuksiltaan ja tarpeiltaan radikaalisti, jolloin suora vertailu on jokseenkin turhaa.

Johdannon ja yleisen aiheen esittelyn jälkeisessä kappaleessa 2 on käsiteltyä ja jaoteltuna meriliikenteen päästökehityksen merkityksellisimmät säädännölliset tahot sekä tähän mennessä meriliikenteen päästöille asetetut tavoitteet. Pääasialliset meriliikenteeseen vaikuttavat tahot ovat Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO), jonka vaikutuksen alaisena ovat kaikki maailman merialueet ja niitä käyttävät alukset. Kansainvälisen merenkulkujärjestön luoma MARPOL-yleissopimus on erittäin kattava sääntöteos, jota kaikki sen alaiset merialukset noudattavat. MARPOL-sopimuksen Liite VI määrittelee standardeja sekä rajoituksia aluksista ilmaan syntyville päästöille, kuten pakokaasupäästöt. Liitteen VI määrittelemät rajat pakokaasupäästöille ovat merkityksellisimpiä rajoitteita kansainvälisessä merenkulussa syntyvistä pakokaasupäästöistä. Toiseksi suurin meriliikennettä säätelevä taho on Euroopan unioni, jonka vaikutusalueena on kaikki EU:hun kuuluvat merialueet ja niiden piirissä toimivat

alukset. EU:n asettamat olennaisimmat meriliikenteen päästötavoitteet liittyvät EU:n Green Deal -vihreän kehityksen ohjelmaan ja siihen liittyviin osakokonaisuuksiin. Meriliikennettä koskevat päästötavoitteet liittyvät unionin komission ehdottamaan Fit for 55-ilmastopakettiin ja mm. sen sisältämään FuelEU Maritime -aloitteeseen sekä meriliikenteen sisällyttämiseen EU:n päästökauppaan. Tämän opinnäytetyön valmistumisen aikaan (kevät 2022), Fit for 55-ilmastopaketin lopullista sisältöä ei ole vielä julkaistu.

Tutkimuksen varsinainen käsittelyosio sisältyy työn kolmanteen ja neljänteen kappaleeseen. Kolmannessa kappaleessa sisältö perustuu vaihtoehtoisten polttoaineiden käsittelyyn. Osiossa tarkastellaan neljää eri polttoainetyyppiä, joiden käyttö kuitenkin perustuu tavanomaisten polttomoottorien käyttämiseen aluksissa. Kappaleessa käsitellään kaasumaisia ja nestemäisiä polttoaineita, maakaasua ja biokaasua, jotka koostuvat pääasiassa metaanista, sekä propanista ja butaanista koostuvaa nestekaasua. Normaaleissa ympäristön lämpötiloissa kaasuna esiintyvät aineet vaativat säilytykseen ja kuljetukseen vaativampaa laitteistoa, sillä kaasuja varastoidaan voimakkaasti paineistettuina tai nesteytettynä erittäin alhaisissa lämpötiloissa. Kappaleessa käsitellään myös metanolia ja kahta biopolttoainetta, FAME ja HVO. Nämä ovat normaaliolosuhteissa nestemäisiä, ja toimivat enimmäkseen vastaavasti kuin normaalit polttoaineet, kuten dieselit ja raskas polttoöljy. Nestemäisen ja paineistamattoman varastointimuodon takia em. polttoaineet pystyvät hyödyntämään tämänhetkistä polttoaineinfrastruktuuria tehokkaasti.

Neljännessä osiossa käsiteltiin muita päästönvähennysmenetelmiä, kuten pakokaasujen jälkikäsittelyä sekä vaihtoehtoisia moottoriratkaisuja, jotka eivät ole perinteisiä polttomoottoreita. Kappaleessa tarkasteltiin myös maasähkön hyödyntämistä satamissa, joka laskee laiturissa syntyviä pakokaasupäästöjä. Tälläkin hetkellä käytössä olevat pakokaasujen jälkikäsittelymenetelmät säilyvät ajankohtaisina, sillä monet vaihtoehtoiset polttoaineet tarvitsevat jälkikäsittelyä päästörajojen alittamiseksi. Käsitellyt pakokaasun jälkikäsittelymenetelmät ovat yleisimmät menetelmät, pakokaasujen rikkipesurit, selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen SCR, sekä ureainjektio (AdBlue). Kappaleen toisen puoliskon muodostaa vaihtoehtoiset moottoriratkaisut, joissa tarkastelun kohteena on akkukäyttöiset sähkötoimiset (ja hybridi) alukset, polttokennojen käyttö aluksissa sekä mahdollinen ydinvoima siviilialusten käytössä.

Tutkimuksessa käsiteltävien menetelmien ja teknologioiden vaikutukset ja tarpeet infrastruktuuri, turvallisuuden ja operoinnin kannalta vaihtelevat reilusti. Osa ratkaisuksista ovat teknologialtaan kehittyneitä, ja niitä pystytään ottamaan käyttöön hyvinkin nopealla aikataululla, varsinkin satamissa, kun taas osa ratkaisuksista vaativat laajoja rakennushankkeita ja suuria investointeja käyttöönoton edellyttämiseksi. Jotkin ratkaisut ovat lupaavia paperilla, mutta edellyttävät vielä vuosia kehitystä ennen kuin tekniikka voidaan ottaa kaupallisella tasolla käyttöön. Tässä tutkimuksessa käsitellyt menetelmät ovat yleisimpiä käytössä olevia ratkaisuja ja tehokkaita, mutta keskeneräisiä tekniikoita, sekä DNV GL:n 2021 raportin mukaisesti todennäköisimpiä tulevaisuuden ratkaisuja.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyö kerää vastauksia hyvin päätutkimuskysymyksiin jokaisesta käsitellystä aiheesta ja kyseiset kysymykset perustavatkin lähes koko tutkimuksen sisällön. Alatutkimuskysymysten vastaukset sekä osittain pääkysymysten vastauksien monipuolisuus vaihteli osittain käsittelystä päästövähennysmenetelmästä johtuen, sillä kaikki kysymykset eivät soveltuneet täysin kaikkiin käsiteltyihin menetelmiin, lähinnä menetelmien monipuolisuuden takia. Päätutkimuskysymykset olivat laajoja kysymyksiä, joten vastauksia oli jäseneltävä ja muotoiltava tutkimuksen mittakaavaan sopiviksi. Työssä oli myös otettava huomioon kysymysten luonne, joka käytännössä tarkoitti laajoja vastauksia, jotka käsitelivät eri menetelmiä, eivätkä vastanneet suoraan kysymyksiin. Yksi opinnäytetyön haasteista olikin mittakaavan asettaminen ja sen pitäminen käsittelykappaleita työstäessä. Kysymykset olivat laajoja, joten yhtenäisen yksityiskoh-taisuuden ja sisällön tuottamiseksi oli pysyttävä jotakuinkin samalla yksityiskohtien tasolla eri menetelmien välillä.

Tutkimuksen tuloksissa on otettava huomioon, että monet käsitellyt menetelmät (varsinkin vaihtoehtoiset polttoaineratkaisut) ovat pääasiallisesti kehitysvaiheessa, ja niiden käsitellyt ominaisuudet perustuvat tämänhetkiseen tietoon, vaikka tarkoitettu käyttöönotto tapahtuisikin seuraavien vuosikymmenien aikana. Käytetyn materiaalin luotettavuus on kuitenkin hyvä, sillä päästörajoitteiden kehitys ja tiedot perustuvat kaikki suurten virallisten tahojen verkkosisältöön, kuten EU:n ja IMO:n asetuksiin ja säädäntöön. Kuten useasti mainittu,

EU:n Fit for 55-ilmastopakettien sisältö voi vielä muuttua. Eri päästövähennysmenetelmien tutkimuksessa käytettiin pääasiassa tunnettujen ja yleisten resursien lähteitä, ja ennen kaikkea samaan aiheeseen perustuvia lähteitä verrattiin toisiinsa oikean tiedon varmistamiseksi.

Opinnäytetyön aihevalinta syntyi pakon saattamana oman mielenkiinnon ja ammattikorkeakoulun MEPTEK-hankkeen sisällön onnekkana yhdistelmänä. Aihe sivuaa reilusti ympäristö- ja energiatekniikkaa sekä merenkulkua, mutta aihe kuitenkin hyväksyttiin logistiikan opinnäytetyön aiheeksi keväällä 2021, tutkimus ja kehitys -kurssin yhteydessä. Aihe oli minulle mielenkiintoinen ja helposti jäseneltävä, jotka olivat minua eniten motivoivat tekijät. Vaikka aihe on mielenkiintoinen, minulla ei ole aiheeseen juurikaan henkilökohtaisia sitoumuksia tai suurempia haluja työllistyä meriliikenteen päästöalalle, enempää kuin muuallekaan. Työn aktiivinen työstäminen alkoi loka-marraskuussa 2021, töiden loppumisen jälkeen, jolloin pystyin työskentelemään opinnäytetyön parissa täysiaikaisesti. Työ valmistui käytännössä kokonaisuudessaan marraskuun 2021 ja huhtikuun 2022 välillä, helmi-maaliskuu vaihteessa työskentely hidastui väliaikaisesti, pitkittyneen koronasairastumisen takia. Työ valmistui kuitenkin minulle mieluisassa ajassa, ja osasin arvioida projektin laajuuden hyvin. Suurta työsarkaa se ei kuitenkaan helpottanut. Voisin tulkita nyt työn valmistuttua, että osaan arvioida työmäärän suhteellisen hyvin suuremmillekin projekteille, ja työstäminen on entistäkin enemmän vahvistanut lähestymistapaani pitkäjänteisyyttä vaativiin tehtäviin; Pala kerrallaan.

LÄHTEET

Alfa Laval. 2019. Scrubber sludge – what is it? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.alfalaval.com/microsites/puresox/compliance-blog/scrubber-sludge-what-is-it/> [viitattu 17.2.2022].

Carriage of chemicals by ship – MARPOL Annex II – MARPOL Annex III. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/ChemicalPollution-Default.aspx> [viitattu 1.12.2021].

DNV GL. 2019. Maritime – Publications – Assesment of selected alternative fuels and technologies in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/maritime/publications/alternative-fuel-assessment-download.html> [viitattu 26.11.2021].

DNV GL. 2020. Using biodiesel in marine diesel engines: new fuels, new challenges. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/news/using-bio-diesel-in-marine-diesel-engines-new-fuels-new-challenges-186705> [viitattu 3.2.2022].

DNV GL. s.a. The gas value chain – Onshore LNG storage. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/oilgas/natural-gas/onshore-lng-storage.html> [viitattu 9.2.2022].

Elgas. 2021. Propane Gas Storage: LPG – Propane Gas Storage Done Safely. Blogi. Saatavissa: <https://www.elgas.com.au/blog/2253-how-is-lpg-propane-stored-safe-storage/> [viitattu 24.1.2022].

Energy Industry Review. 2021. Fighting Against Air Pollution: Methanol Fuel Cells to Provide Higher Efficiency. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://energyindustryreview.com/analysis/fighting-against-air-pollution-methanol-fuel-cells-to-provide-higher-efficiency/> [viitattu 1.2.2022].

EU Green Deal Office. 2021. EU Green Deal -ohjelma vuonna 2021 - Fit For 55 -paketti. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://greendealoffice.fi/artikkelit/eu-green-deal-ohjelma-vuonna-2021-fit-55-paketti> [viitattu 9.12.2021].

Euroopan Komission ehdotus (EK) 2021/0211. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:618e6837-ee6-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0019.02/DOC_1&format=PDF [viitattu 9.12.2021].

Euroopan Komissio. 2021b. Proposal for a regulation of the european parliament and of the council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf [viitattu 10.12.2021].

Euroopan Komissio. s.a. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi [viitattu 29.11.2021].

European Community Shipowners' Associations. 2021. FuelEU Maritime – Avoiding Unintended Consequences. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ecsa.eu/sites/default/files/2021-06/ECSA%20ICS%20FuelEU%20Maritime%20report%20-%20final.pdf> [viitattu 10.12.2021].

Fuel Cell Works. 2020. Breakthrough in the Reconversion of Methanol into Hydrogen for Fuel Cells. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://fuelcells-works.com/news/breakthrough-in-the-reconversion-of-methanol-into-hydrogen-for-fuel-cells/> [viitattu 1.2.2022].

Gasum. s.a. How is biogas produced? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gasum.com/en/our-operations/biogas-production/how-is-biogas-produced/> [viitattu 19.1.2022].

IEA Bioenergy. 2017. Biofuels for the marine shipping sector. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/02/Marine-biofuel-report-final-Oct-2017.pdf> [viitattu 4.2.2022].

IMO. 2014. Third IMO GHG Study 2014 – Executive Summary and Final Report. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf> [viitattu 7.12.2021].

IMO. 2016. IMO Train the Trainer (TTT) Course On Energy Efficient Ship Operation. Module 2 – Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20Energy%20Efficiency%20Regulations%20-%20IMO%20TTT%20course%20presentation%20final1.pdf> [viitattu 8.12.2021].

IMO. 2019. Technical and Operational Measures – Energy Efficiency Measures. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx> [viitattu 7.12.2021].

IMO. 2020. IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx> [viitattu 16.2.2022].

IMO begins work on GHG emissions - Historic Background. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Historic%20Background%20GHG.aspx> [viitattu 30.11.2021].

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention->

[for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](#) [viitattu 1.12.2021].

International Labour Organization / Työterveyslaitos. s.a. ICSC – 0057 META-NOLI. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.ilo.org/dyn/icsc/show-card.display?p_card_id=0057&p_version=1&p_lang=fi [viitattu 1.2.2022].

Marine Insight. 2021a. A guide to Scrubber System on Ship. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/> [viitattu 17.2.2022].

Marine Insight. 2021b. Dry Dock, Types of Dry Docks & Requirements for Dry Dock. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/guidelines/dry-dock-types-of-dry-docks-requirements-for-dry-dock/> [viitattu 21.3.2022].

Marine Insight. 2021c. Reasons for Using High Voltage Systems On board Ships. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.marineinsight.com/marine-electrical/reasons-for-using-high-voltage-systems-on-board-ships/> [viitattu 3.3.2022].

Marine Vessel charging systems. s.a. Wärtsilä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/marine/build/electrical-and-power-systems/shore-power/charging> [viitattu 11.3.2022].

MARPOL Annex I – Prevention of Pollution by Oil. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/OilPollution-Default.aspx> [viitattu 1.12.2021].

MefCO2. 2018. Mapping out renewable methanol around the world. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.mefco2.eu/news/mapping-out-renewable-methanol-around-the-world.php> [viitattu 1.2.2022].

Methanex. s.a. About methanol – Methanol as a Marine Fuel. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.methanex.com/about-methanol/methanol-marine-fuel> [viitattu 31.1.2022].

Methanol Institute. 2016. Methanol Safe Handling: Technical Bulletin – Atmospheric Above Ground Tank Storage of Methanol. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/AtmosphericAboveGroundTankStorageMethanol-1.pdf> [viitattu 1.2.2022].

National Energy Technology Laboratory. s.a. Syngas conversion to Methanol. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/methanol> [viitattu 1.2.2022].

NRDC. 2021. Hydrogen Safety: Let's Clear the Air. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.nrdc.org/experts/christian-tae/hydrogen-safety-lets-clear-air> [viitattu 15.3.2022].

Offshore Energy. 2021. EU revises ETS to include shipping sector. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.offshore-energy.biz/eu-revises-ets-to>

[include-shipping-sector/](#) [viitattu 13.12.2021].

Osaka Gas. 2017. Document Story - Project to construct one of the world's largest LNG storage tank. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.osakagas.co.jp/en/company/enterprise_future/article2/ [viitattu 24.1.2022].

Port of Helsinki. 2017. Safety manual on LNG bunkering procedures for the Port of Helsinki. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.portofhelsinki.fi/sites/default/files/attachments/Port%20of%20Helsinki%20Safety%20manual%20on%20LNG%20bunkering.pdf> [viitattu 29.1.2022].

Prevention of Air Pollution from Ships – Revised MARPOL Annex VI. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx> [viitattu 1.12.2021].

Prevention of Pollution by Garbage from Ships – MARPOL Annex V. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Garbage-Default.aspx> [viitattu 1.12.2021].

Prevention of Pollution by Sewage from Ships – Annex IV of MARPOL. s.a. IMO. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Sewage-Default.aspx> [viitattu 1.12.2021].

Public Utilities Regulatory Authority PURA. s.a. What is LNG? WWW-dokumentti. Päivitetty toukokuu 2021. Saatavissa: <https://portal.ct.gov/PURA/Gas-Pipeline-Safety/What-is-LNG> [viitattu 24.1.2022].

Seacrestor. s.a. Marine Urea Solution – Frequently Asked Questions. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://marineurea.com/faq/> [viitattu 18.2.2022].

Selective Catalytic Reduction (SCR) - Encyclopedia. s.a. Wärtsilä. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/selective-catalytic-reduction-\(scr\)](https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/selective-catalytic-reduction-(scr)) [viitattu 18.2.2022].

SHV Energy. s.a. What is bioLPG? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.shvenergy.com/what-we-do/biolpg> [viitattu 19.1.2022].

STOREMASTA. 2021. How to Store and Handle Liquefied Petroleum Gas (LP Gas): A Complete Guide. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://blog.storemasta.com.au/how-to-store-and-handle-liquefied-petroleum-gas-lp-gas-a-complete-guide> [viitattu 18.2.2022].

Suomen Varustamot. s.a. Vastuullisuus – Ilmastonsuojelu ja ilmastonmuutos. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/ilmastosuojelu-ja-ilmastonmuutos/> [viitattu 25.11.2021].

Traficom. 2021. Päästösäätely ja valvonta. Julkaisematon diasarja. Meriliikenteen päästöt-onlinetyöpaja 6.10.2021 [viitattu 29.11.2021].

Transport & Environment. 2020. Maritime ETS public consultation – Detailed T&E briefing on the design options. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/Maritime%20ETS%20public%20consultation%20briefing.pdf> [viitattu 13.12.2021].

Transport & Environment. 2021. FuelEU Maritime - Shipping required to switch fuel but without clear path to sustainable alternatives. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/08/FuelEU-Maritime.pdf> [viitattu 13.12.2021].

TÜV SÜD. s.a. Hydrogen Storage, Transportation and Distribution. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.tuvsud.com/fr-fr/industries/energie/conventional-power/hydrogen-services/hydrogen-storage-transportation-and-distribution> [viitattu 15.3.2022].

US Department of Energy. s.a. Advanced Small Modular Reactors (SMRs). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs> [viitattu 21.3.2022].

VTT. 2016. Technical Study on Scrubber Waste Management. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://backfromblack.eu/data/documents/Technical-Study-on-Scrubber-Waste-Management-VTT-Helsingin-satama.pdf> [viitattu 17.2.2022].

World Nuclear Association. 2021. Nuclear-Powered Ships. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/nuclear-powered-ships.aspx> [viitattu 21.3.2022].

World Nuclear Association. 2022. Nuclear Power in the World Today. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx> [viitattu 21.3.2022].

Wärtsilä. 2015. Creating Optimal LNG Storage Solutions. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/insights/article/creating-optimal-lng-storage-solutions> [viitattu 18.1.2022].

Wärtsilä. 2017. Wärtsilä engineers offer technical solutions for cold ironing. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/insights/article/wartsila-engineers-offer-technical-solutions-for-cold-ironing> [viitattu 3.3.2022].

Wärtsilä. 2018. Small- and medium-scale LNG terminals. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.wartsila.com/docs/default-source/Power-Plants-documents/lng/small-and-medium-scale-lng-terminals_wartsila.pdf [viitattu 24.1.2022].

Wärtsilä. 2021. Wärtsilä Solutions for Alternative Marine Power. WWW-

dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/marine/build/electrical-and-power-systems/shore-power/alternative-marine-power> [viitattu 3.3.2022].

KUVALUETTELO

Kuva 1. Tier I, II ja III NO_x – päästörajoitukset. Intovuori, V. Julkaisematon diasarja 6.10.2021. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.

Kuva 2. Reduction factor and cut-off limits. IMO. 2016.

Kuva 3. Breakdown of CO₂ emissions from EU shipping in 2019 by potential maritime ETS scope. Transport & Environment. 2020.

Kuva 4 ja 5. Polttoaineiden volumetrinen/gravimetrinen energiatiheys. Energiatiheyksien arvot haettu Wikipediasta. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density [viitattu 17.4.2022].

Kuva 6. Single, double & full containment tank. Small- and medium-scale LNG terminals. Wärtsilä. 2018.

Kuva 7. Alternative Marine Power. Marine Insight. 2021.