KONSEPTITASON TARKASTELU REGULAATION ASETTAMISTA VAATIMUKSISTA METANOLIPOLTTOAINEJÄRJESTELMÄLLE LAIVASSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Tapani Alaoja

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti

Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Energiatekniikka

Tapani Alaoja

Konseptitason tarkastelu regulaation asettamista vaatimuksista metanolipolttoaine-järjestelmälle laivassa

Energiatekniikan diplomityö

2023

73 sivua, 24 kuvaa ja 13 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti ja Tutkijaopettaja Antti Uusitalo

Avainsanat: Metanoli, polttoainejärjestelmä, konsepti, suunnittelu, regulaatio, merenkulku, laiva

Energiamurros on aktiivisesti käynnissä meriliikenteessä. Sen edelleen kiihdyttämiseksi päästövähennystavoitteita on kiristetty tänä vuonna Pariisin ilmastosopimuksen linjan mukaisiksi. Regulaatio uusiutuu niin viranomaisten, kuin myös luokituslaitosten suunnalta samaan aikaan, kun alan teknologinen osaaminen kehittyy. Keskellä tätä murrosta metanolista on tullut suosituin vaihtoehtoinen polttoaine laivojen globaalissa tilauskannassa.

Metanolipolttoainejärjestelmään kohdistuvat regulaation vaatimukset ovat mielenkiintoisia esimerkiksi uutta laivaa hankkivan tai sitä suunnittelevan näkökulmasta, sillä järjestelmä poikkeaa huomattavasti perinteisistä öljypolttoaineisiin perustuvista järjestelmistä. Myös metanolin ominaisuudet ovat hyvin erilaiset. Mikäli konseptitason vaatimuksiin varaudutaan projektissa hyvissä ajoin, voidaan saada aikaiseksi kustannus- ja energiatehokas järjestelmä.

Tässä työssä käytiin läpi IMO:n ja DNV:n asettamaa regulaatiota viitekehyksessä oleellisten sääntöjen ja niiden välisten erojen tunnistamiseksi. Tämän jälkeen irralliset sääntökohdat kerättiin yhteen aihealueittain ja tietoa jalostettiin edelleen kuviksi. Näistä kuvista lukijan on mahdollista saada karkean tason käsitys laivan metanolipolttoainejärjestelmälle ja sen oheisjärjestelmille asetetuista vaatimuksista. Tehtyjen kuvien ja löydösten perusteella voidaan todeta, että järjestelmästä kannattaa tehdä alueellisesti keskitetty ja yksinkertainen. Lisäksi kannattaa suosia mahdollisimman pieniä tuuletettavia tiloja ja laitteiston sijoittamista ulkokansille.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Energy Technology

Tapani Alaoja

Concept level study of requirements set by regulation for the methanol fuel supply system in a vessel

Master's thesis

2023

73 pages, 24 figures and 13 tables

Examiners: Full Professor Teemu Turunen-Saaresti and Associate Professor Antti Uusitalo

Keywords: Methanol, fuel, system, concept, design, regulation, marine, vessel

Energy transition is actively ongoing in marine sector. To further increase the pace of transition, global emission reduction objectives have been tightened this year to meet the Paris agreement ambitions. Regulation is in constant motion moved by the authorities and classification societies while the technological knowhow improves in the industry at the same time. In middle of this transition methanol has taken its place as the most popular marine fuel in the global orderbook for new vessels.

Requirements of the regulation related to the methanol fuel supply system are interesting in the eyes of the builder or designer of a new vessel, since the system differs significantly from traditional fossil fuel oil -based systems. Additionally, the qualities of methanol are very different. If the concept level requirements have been considered in the early stages of the project, the system can be made cost and energy efficient.

The regulation set by IMO and DNV was processed in this thesis to recognize the relevant rule points and the differences between the regulations in the framework of the thesis. Separate rule points were then grouped under different topics and this information was further refined into pictures. It is possible for the reader to get general perception of the requirements for the methanol fuel supply system and its auxiliary system from these pictures. The systems should be made as simple and concentrated as possible based on the pictures and the findings made in this thesis. Additionally, the ventilated spaces should be minimized and the equipment should be placed in naturally ventilated deck where possible.

KIITOKSET

Haluan kiittää työnantajaani mahdollisuudesta tehdä tämä opinnäytetyö todella ajankohtaisesta ja mielenkiintoisesta aiheesta energiamurroksen terävimmässä kärjessä. Opintojeni ja tämän työn tekeminen samaan aikaan, kun olen ollut rakentamassa metanolipolttoainejärjestelmiin perustuvaa liiketoimintaa ja toteuttamassa alan ensimmäisiä projekteja, on ollut erittäin opettavainen ja antoisa matka.

Vastaavalla tavalla tämä opintojeni kahden ja puolen vuoden ajanjakso on tuntunut ajoittain myös äärettömän raskaalta, stressaavalta ja pitkältä. Minulla ei ole sanoja ilmaisemaan kiitollisuuttani puolisoani Emmiä kohtaan. Hän on tukenut minua kaikissa tilanteissa aina opintojen alkuinnostuksesta epätoivon hetkiin.

Lopuksi, inspiroituneena ja osin lainatakseni Snoop Doggin puhetta, hänen saadessaan tähden Hollywoodin Walk of Fame:lle:

Haluan kiittää itseäni.

Haluan kiittää itseäni siitä, että
olen uskonut itseeni
olen tehnyt kovasti töitä
olen oppinut olemaan armollisempi itselleni
olen kasvanut matkallani

En luovuttanut.

LYHENNELUETTELO

AEGL	akuutin altistumisen raja-arvot (Acute Exposure Guideline Levels)
CII	hiilidioksidipäästöintensiteetin indikaattori (Carbon Intensity Indicator)
CNG	paineistettu maakaasu (Compressed Natural Gas)
DME	dimetyylieetteri (Dimethyl Ether)
DNEL	taso, jota korkeammille pitoisuuksille ihmisiä ei pitäisi altistaa (Derived No-Effect Level)
EEDI	laivojen suunnittelun energiatehokkuusindeksi (Energy Efficiency Design Index)
EEXI	käytössä olevien laivojen energiatehokkuusindeksi (Energy Efficiency Existing ship Index)
FC	polttokenno (Fuel Cell)
HVO	vetykäsitelty kasviöljy (Hydrotreated Vegetable Oil)
ICE	polttomoottori (Internal Combustion Engine)
IMO	yhdistyneiden kansakuntien alainen kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
LC50	konsentraatio, joka tappaa puolet altistuneista (Lethal Concentration, 50)
LD50	annos, joka tappaa puolet altistuneista (Lethal Dose, 50)
LHV	tehollinen lämpöarvo (Lower Heating Value)
LBG	nesteytetty biokaasu (Liquefied Biogas)
LMG	nesteytetty metaani (Liquefied Methane Gas)
LNG	nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
LPG	nestekaasu (Liquefied Petroleum Gas)

MEPC	IMO:n meriympäristön suojelukomitea (Marine Environment Protection Committee)
MGO	meriliikenteessä käytettävä kaasuöljy (Marine Gasoil)
STEL	suurin sallittu altistuminen keskimäärin 15 minuutissa (the Short-Term Exposure Limit)
TWA	suurin sallittu altistuminen keskimäärin kahdeksan tunnin työpäivän ja 40-tuntisen työviikon aikana (the Time Weighted Average exposure limit)
WTT	elinkaari polttoaineen tuotannosta tankkiin (Well-To-Tank)
WTW	koko elinkaari polttoaineen tuotannosta propulsioon (Well-To-Wake)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

1 Johdanto 11
1.1 Työn tavoitteet 11
1.2 Aineisto, menetelmät ja tutkimusympäristö 12
1.3 Aiempi tutkimus ja kirjallisuushaut 13
1.4 Työn rakenne 14
2 Laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöt, niiden hillitsemiseen tähtäävä regulaatio sekä energiamurros laiva- ja tilauskannassa 15
2.1 Laivaliikenteen päästöt 15
2.2 Päästöjä ohjaava regulaatio 17
2.2.1 Energy Efficiency Design Index 18
2.2.2 Energy Efficiency Existing ship Index 19
2.2.3 Carbon Intensity Indicator 19
2.3 Öljypolttoaineiden korvaamisen teknologinen tilanne ja tulevaisuudennäkymät 19
2.4 Energiamurroksen tilannekatsaus laiva- ja tilauskannassa 20
3 Metanoli 23
3.1 Yleisiä käyttökohteita 23
3.2 Ominaisuuksia 24
3.2.1 Materiaalivalinnat 25
3.2.2 Palontorjunta 25
3.2.3 Myrkyllisyys ihmisille 26
3.2.4 Suojavälineet 28
3.3 Metanolin tuotantotavat 28
3.4 Nykyinen tuotanto ja tulevaisuuden näkymät 30
3.5 Hinnan kehitys ja markkinan koko 31

3.6 Metanoli suhteessa muihin polttoaineisiin 32
3.6.1 Polttoaineiden systeemitason teknistä vertailua polttomoottorikäytössä 32
3.6.2 Metanolin ja dieselin palamisen vertailua polttomoottorissa 33
3.6.3 Polttoaineiden säilyttämisestä ja energiasisällöstä 34
3.6.4 Sähköpolttoaineiden tuotannon hyötysuhteista 37
3.6.5 Vuotojen haitallisuus meressä 37
3.6.6 Elinkaaren aikaiset päästöt eri polttoaineilla 38
3.6.7 Polttoaineiden elinkaaren energiankäytön kertoimia 39
3.6.8 Elinkaarihintoja eri polttoaineille laivatyypeittäin 40
3.6.9 Polttoaineiden vastuullisuuden arviointi 42
4 Regulaation asettamat rajoitukset aihealueittain 46
4.1 Sääntöjen tavoitteet ja filosofia 46
4.2 Tankit ja järjestely 46
4.3 Polttoaineputkiston vaatimukset 50
4.4 Inerttijärjestelmä 51
4.5 Bunkkeriasema 53
4.6 Ilmalukko 54
4.7 Ilmanvaihto 55
4.8 Kaasuvaaralliset tilat 55
4.9 Metanolipilssi 57
4.10 Kaasuvuotojen tunnistaminen 59
4.11 Paloturvallisuus / palonsammutus 60
4.12 Turvallisuusjärjestelmä 61
4.13 Polttoainejärjestelmän vaatimusten yhteenveto ja vertailu 62
5 Johtopäätökset 65
Lähteet 69

Kuvaluettelo

Kuva 1: Suunnittelun vaiheet osana projektia

Kuva 2: Kansainvälisen merenkulun hiilidioksidipäästöt vuodesta 2000

Kuva 3: Erilaisten ratkaisujen hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali merenkulussa

Kuva 4: Metanolia astiassa

Kuva 5: Metanolin luokittelua valmistustavan mukaan

Kuva 6: Metanolin tuotantomääriä ja -kapasiteetteja

Kuva 7: Metanolin hinta Euroopassa 6/2020–6/2023

Kuva 8: Polttoaineiden WTW ja WTT tietoja

Kuva 9: Energiantarve suhteessa propulsion tuottamaan energiaan, kWh/kWh

Kuva 10: Isojen lauttojen ja yleisrahtialusten kokonaiskustannukset, miljoonaa euroa

Kuva 11: Bulkki- ja konttialusten kokonaiskustannukset, miljoonaa euroa

Kuva 12: Eri vastuullisuusnäkökulmien suhteellinen tärkeys eri sidosryhmille

Kuva 13: Eri sidosryhmien näkemys polttoaineiden vastuullisuudesta, suurin arvo on yksi ja loput siitä laskettuja suhteellisia arvoja

Kuva 14: Polttoainetankkien, kuivasäiliöiden ja polttoainekäsittelytilan tilasuhteet

Kuva 15: Metanolitankin ja kuivasäiliön oleellinen varustus

Kuva 16: Tankki ulkokannella

Kuva 17: Polttoaineputkiston vaatimuksia

Kuva 18: Inerttijärjestelmän ominaisuuksia

Kuva 19: Bunkkeriasemalle asetettuja vaatimuksia

Kuva 20: Ilmalukon mittatietoja

Kuva 21: Kaasuvaarallisia tiloja, alue 0

Kuva 22: Kaasuvaarallisia tiloja, alue 1

Kuva 23: Kaasuvaarallisia tiloja, alue 2

Kuva 24: Kaasuvuotojen tunnistuspaikkoja

Taulukkoluettelo

Taulukko 1: Teknologisen ja regulatorisen valmiuden ennuste

Taulukko 2: Käytössä olevien laivojen polttoainejakauma

Taulukko 3: Tilauskannassa olevien laivojen polttoainejakauma

Taulukko 4: Metanolin, LPG:n ja LNG:n muutokset vuoden 2022 tilauskannassa olevien ja vuoden 2023 elokuuhun mennessä tilattujen välillä

Taulukko 5: Metanolin ominaisuuksia

Taulukko 6: Metanolin myrkyllisyystietoa oraali-, dermaali- ja inhalaatioaltistuksessa

Taulukko 7: Akuutin altistumisen raja-arvot

Taulukko 8: Ei biologista alkuperää olevien uusiutuvien polttoaineiden vertailua raskaaseen polttoöljyyn

Taulukko 9: Polttoaineiden energiasisältöjä ja -tiheyksiä eri säilytysolosuhteissa

Taulukko 10: Polttoaineiden energiatiheyksiä suurimmasta pienimpään

Taulukko 11: LC50 pitoisuuksia eri polttoaineille

Taulukko 12: Meripolttoaineiden vastuullisuuden arvioinnin kriteerejä

Taulukko 13: Osa-alueiden yhteenveto ja vertailu

1 Johdanto

Energiamurros tapahtuu nopeasti ja nykyään meriliikenteen puolella entistä kiihkeämpään tahtiin IMO:n päivitettyä kasvihuonekaasupäästöjen nettonollatavoitteen vuodelle 2050 Pariisin ilmastosopimuksen mukaisesti (IMO 2023). Perinteisille meriliikenteen polttoaineille, kuten raskaalle polttoöljylle tai dieselille, on jo aiemmin haettu vähemmän saastuttavia vaihtoehtoja ja kiristetty regulaatiota esimerkiksi rikkipäästöjen osalta. Viimeisinä vuosina puhtain ja ainoa pitkien merimatkojen kannalta saatavilla ollut, niin sanottu uuden sukupolven, polttoaine on ollut nesteytetty maakaasu (LNG). Kuitenkin hiljattain metanoli on saanut entistä suurempaa huomiota, vaikka regulaatio on vielä varhaisessa kehitysvaiheessa. Tänä vuonna, 2023, metanolista on tullut uusien laivojen tilauskannassa suosituin vaihtoehtoinen polttoaine (DNV 2023a). Uuden sukupolven polttoaineita ovat tässä työssä mm. metaani, metanoli, ammoniakki ja vety, jotka ovat saaneet ehkä eniten huomiota. Myös dimetyylieetteriin ja litiumioniakkuihin viitataan ohuesti.

Aiemmin ei ole tehty tarkastelua regulaation asettamista konseptitason vaatimuksista metanolipolttoainejärjestelmälle. Työ tehtiin vertailemalla IMO:n väliaikaista metanolisäännöstöä ja DNV:n vuoden 2023 sääntöjä. Vertailun pohjalta pyrittiin tunnistamaan sääntöjen isot linjat sekä hakemaan eriäväisyyksiä säännöstöjen kesken. Kerättyä tietoa jalostettiin siten, että lukijalla on mahdollista saada tietoa metanolipolttoainejärjestelmän isoista linjoista ja oheisjärjestelmien vaatimuksista visuaalisina kuvina. Kokonaisuutena järjestelmästä olisi hyvä tehdä alueellisesti mahdollisimman keskitetty ja yksinkertainen, sekä ulkokansia olisi syytä suosia mahdollisuuksien mukaan. Myös tuuletettavista tiloista kannattaa tehdä mahdollisimman pieniä. Näillä keinoilla laivaan saadaan tehtyä kustannus- ja energiatehokas metanolipolttoainejärjestelmä. Työ mahdollistaa tulevaisuuden tutkimusta aiheen saralla muun muassa suunnittelun tai regulaation kehittymisen näkökulmista.

1.1 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena oli selvittää minkälaisia vaatimuksia regulaatio asettaa metanolin käyttämiselle laivapolttoaineena. Tarkastelu jätettiin laivan konseptitasolle, jotta pystyttiin tunnistamaan isossa kuvassa ne ominaisuudet, mitkä ovat leimallisia

metanolipolttoainejärjestelmälle, sen apusysteemeille sekä laivan rakenteellisille vaatimuksille. Tätä kautta pystytään antamaan karkealla tasolla tietoa metanolipolttoainejärjestelmästä kiinnostuneelle, kuten esimerkiksi laivaa suunnittelevalle tai tätä vaihtoehtoa pohtivalle laivan rakennuttajalle. Apua on myös omistajalle, joka pohtii olemassa olevan laivan polttoainejärjestelmän vaihtamista metanolikäyttöiseksi. Konseptisuunnittelu on tässä työssä mielletty kuvan 1 mukaiseksi osaksi suunnittelun päälinjaa. Päälinja on ajateltu työn lineaariseksi etenemiseksi, vaikka suunnittelutyö on luonteeltaan iteratiivista päälinjalla ja osaprosesseissa. Iteraatiokierrokset johtuvat mm. suunnittelun aikana tulevista muuttuvista ja tunnistetuista tarpeista.

Kuva 1 Suunnittelun vaiheet osana projektia

Koska työssä ei ollut varsinaista projektia, johon metanolipolttoainejärjestelmää oltaisiin viemässä, tarkastelu tehtiin yleisellä tasolla eikä myöskään kustannuslaskentaa suoritettu. Työn tuotoksina syntyi useita kaaviomuotoisia kuvia, joista lukijalla on mahdollisuus muodostaa käsitys erilaisista osakokonaisuuksiin kohdistuvista vaatimuksista.

1.2 Aineisto, menetelmät ja tutkimusympäristö

Regulaation vaatimuksia tarkasteltiin IMO:n väliaikaisia metanolille ja etanolille tehtyjen sääntöjen (IMO 2020) ja DNV:n asettamien ohjeiden perusteella (DNV 2023b). Materiaalin käsittelemiseksi sääntökohdat listattiin taulukkomuotoon ja niistä tunnistettiin erilaiset

osasysteemit, joihin yksittäisillä sääntökohdilla on vaikutusta. Tämän listauksen perusteella pystyttiin sitomaan irralliset sääntökohdat hallittaviksi kokonaisuuksiksi ja pyrittiin löytämään ne isot linjat, jotka ovat oleellisia konseptisuunnittelussa eri osakokonaisuuksissa. Tähän liittyy myös työn sisällön suurin riski, sillä merkityksellisyys työn viitekehyksessä jää tekijän oman arvion mukaisiksi. Tehdyn tarkastelun perusteella tietoa jalostettiin ja luotiin osakokonaisuuksista erilaisia kaaviokuvia, jotta lukijalla on mahdollisuus saada nopeammin ja selkeästi käsitys regulaation asettamista vaatimuksista. Koska työssä tarkasteltiin kahta erilaista säännöstöä, se mahdollisti myös eroavaisuuksien tai ristiriitojen tunnistamisen regulaatioiden välillä. Lähtökohtaisesti olettama työssä oli DNV:n säännöstön rakentuvan IMO:n säännöstön luoman perustan päälle ja täydentävän sitä luokituslaitoksen omilla vaatimuksilla. Lisäksi on tunnistettu IGF koodin (IMO 2015) ohjaavan kaikkia matalan leimahduspisteen polttoaineita, mutta se jätettiin huomiotta. Näin tehtiin, koska metanolille on oma IMO:n julkaisema väliaikainen säännöstö ja IGF koodin polttoainemaininnat koostuvat LNG:stä sekä sen keskittyessä laajalti kryogeenisen putkiston ja tankkien suunnitteluun. Metanolisääntöjen tulkitaan sisällöllisesti otsikkotasolla kattavan IGF koodin ja olevan linjassa sen kanssa sekä täten antavan riittävän sisällön työn tekemiselle. Väkevin peruste IGF koodin huomiotta jättämiselle tulee kuitenkin dokumentista itsestään, joka kertoo dokumentin sisältävän maakaasun käytön polttoaineena, ja että muiden matalan leimahduspisteen polttoaineiden säännöstö lisätään täydentämään dokumenttia niiden valmistuttua (IMO 2015, 7).

1.3 Aiempi tutkimus ja kirjallisuushaut

Metanolipolttoainejärjestelmän konseptista on hyvin karkealla tasolla saatavissa periaatteellisia kuvia lähes jokaiselta ekosysteemin yritykseltä, pääkonetoimittajista laitetoimittajiin. Näissä on kuitenkin pyritty kertomaan hyvin yksinkertaisella tavalla, jopa yhdellä kuvalla, järjestelmän pääpiirteet menemättä sen tarkemmin vaatimuksiin. Metanolin käytöstä polttokennoissa löytyy useita tutkimuksia ja useista erilaisista näkökulmista, aina teknistaloudellisista tarkasteluista polttokennojen tekniseen kehitykseen. Vastaavasti myös polttomoottorikäytöstä, palamisesta ja polttoaineen syötöstä tutkimustietoa on hyvin saatavilla, sekä laivatason teknistaloudellisia tutkimuksia.

Ainuttakaan laivan metanolipolttoainejärjestelmään ja oheisjärjestelmiin liittyvää konseptisuunnitteluun liittyvää työtä ei löytynyt. Hakuja suoritettiin yliopiston kirjaston

hakuportaaliin ja google scholar -palveluun eri hakusanoja yhdistelemällä. Hakusanoina käytettiin esimerkiksi: marine, methanol, design, concept, metanoli, konsepti, laiva, järjestelmä, merenkulku.

1.4 Työn rakenne

Työn aluksi tarkastellaan laivaliikenteen tämän hetken päästöjä ja niihin kohdistuvia regulaation asettamia tavoitteita. Näiden lisäksi pääluvussa kaksi tutustutaan myös yleisiin laivojen hiilidioksidipäästöjen vähentämiskeinoihin sekä näiden mittareihin. Pääluvun lopuksi tarkastellaan hieman eri uusien polttoaineiden teknologisia ja regulatorisia valmiuksia, sekä todennetaan käynnissä olevaa energiamurrosta katsomalla nykyisen laivakannan ja tilauskannassa olevien laivojen polttoainevalintoja.

Pääluvussa kolme keskitytään metanoliin ja sen yleisiin, sekä laivassa polttoainekäytön kannalta mielenkiintoisiin, ominaisuuksiin. Lisäksi käydään läpi metanolin valmistustapoja ja markkinatietoa. Noin puolet pääluvusta käytetään vertailemaan metanolia muihin polttoaineisiin; niin perinteisiin öljypolttoaineisiin, kuin myös uuden sukupolven polttoaineisiin.

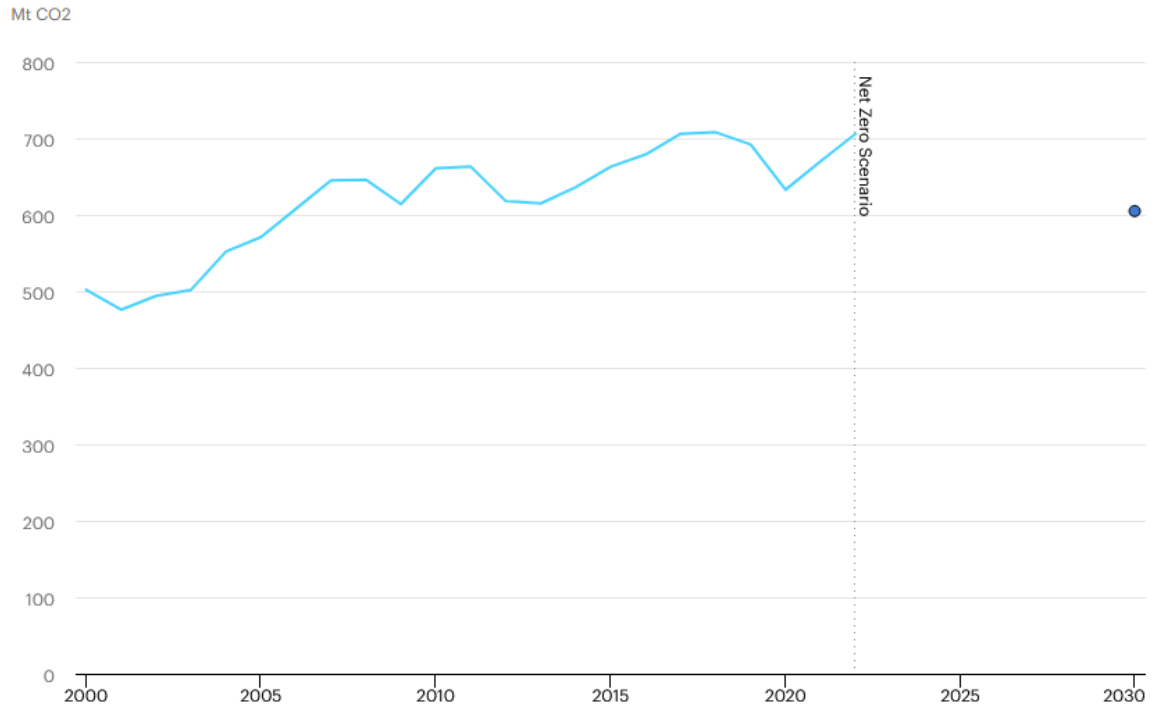
Neljännessä pääluvussa esitetään työssä käydyn aineiston oleellisimmat löydökset. Regulaation rajoitukset on käsittelyn jälkeen jalostettu yksinkertaistetuiksi kuviksi, joista on mahdollista nähdä nopealla katsannolla konseptitason vaatimukset metanolipolttoainejärjestelmälle laivassa. Kuvien lisäksi on käyty läpi oleellisia sääntöjen välisiä eroja, osa-alueiden keskinäisiä suhteita sekä joitakin huomionarvoisia poimintoja teemojen sisällä. Pääluvun lopuksi on tehty kompakti osa-aluekohtainen yhteenveto ja vertailtu niitä öljypolttoainejärjestelmiin. Työn johtopäätökset on esitetty luvussa viisi.

2 Laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöt, niiden hillitsemiseen tähtäävä regulaatio sekä energiamurros laiva- ja tilauskannassa

Päästöjä ohjaa kansainvälisen energiajärjestön IEA:n Net Zero -skenaario. Sen mukaan energiasektorin hiilidioksidipäästöjen pitäisi olla nettonollatasolla vuoteen 2050 mennessä siten, ettei mukaan lasketa energiasektorin ulkopuolisia päästövähennyksiä. Tässä skenaariossa kehittyneiden talouksien tavoitteet ovat muita maita edellä ja lisäksi sen toteuttamiseen liittyvät yhdistyneiden kansakuntien kestävän kehityksen tavoitteet. Skenaario on myös linjassa Pariisin ilmastosopimuksen mukaiseen tavoitteeseen rajoittaa ilmaston lämpenemisen puoleentoista asteeseen. Energiasektori on viime vuosina vastannut kolmea neljäsosaa globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä. (IEA 2022, 6–7.)

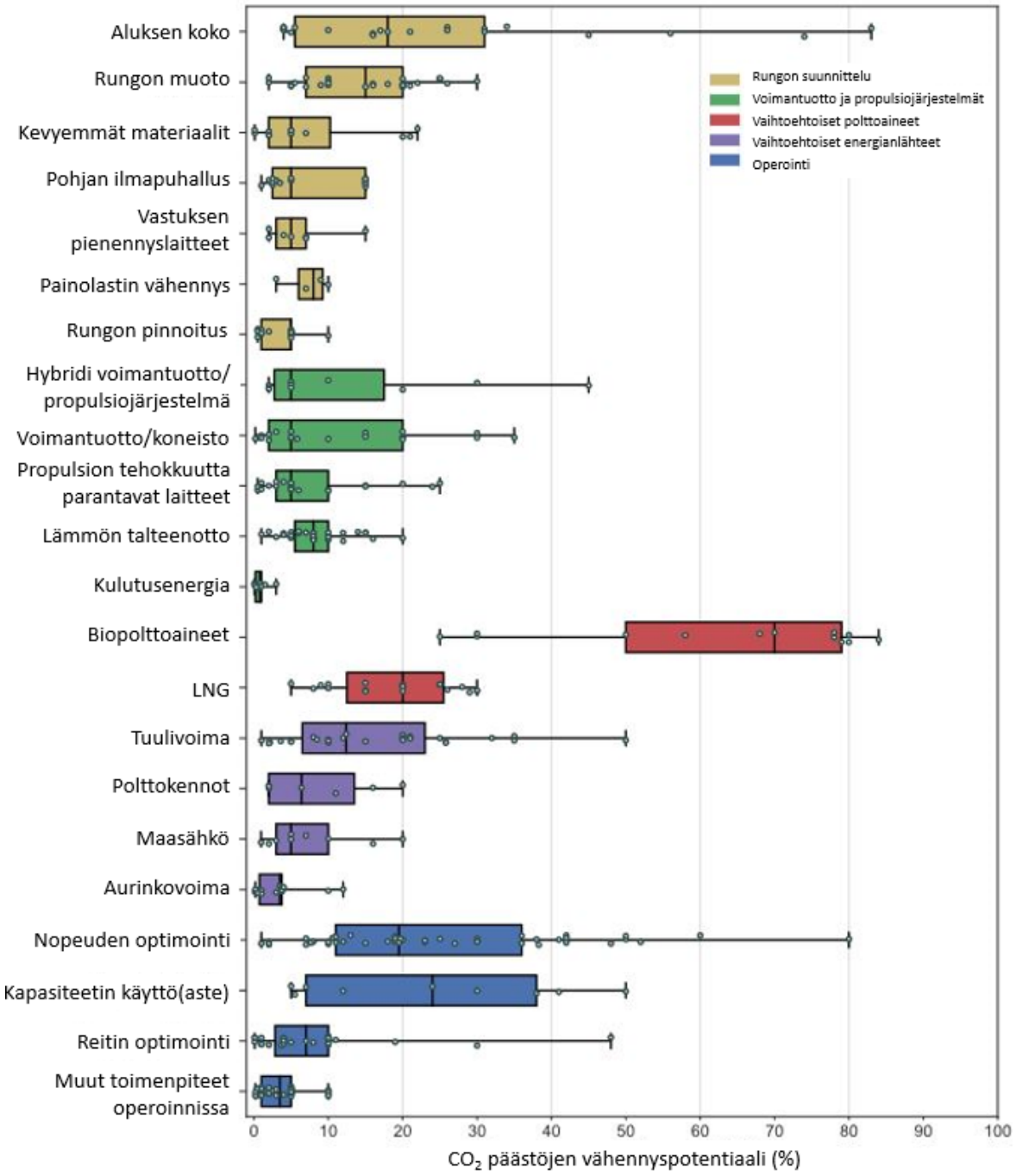
2.1 Laivaliikenteen päästöt

Kansainvälinen laivaliikenne vastasi noin kahta prosenttia maailmanlaajuisista energiaan liittyvistä hiilidioksidipäästöistä vuonna 2022. Vuodessa kasvua tuli noin viisi prosenttia 706 Mt:iin edellisvuoden 670 Mt:sta. Vuonna 2020 päästöt olivat 633 Mt:ssa, jolla tasolla oltiin edellisen kerran vuonna 2013. Päästöjen kehittymistä vuosituhannen alusta on nähtävissä kuvassa 2. Vuonna 2030 IEA:n Net Zero -skenaarion mukainen tavoitetaso hiilidioksidipäästöille on 605Mt. Skenaarion mukaisesti matalahiilisten polttoaineiden osuus kulutetusta energiasta pitäisi olla 13,3 %; josta fossiilisten polttoaineiden kulutus 7,9 EJ, biopolttoaineiden 0,6 EJ, ammoniakin 0,5 EJ, vedyn 0,1 EJ sekä samoin metanolilla 0,1 EJ. Vertailun vuoksi vuonna 2022 fossiilisten polttoaineiden kulutus oli 9,2 EJ matalahiilisten ollessa 0,1 % kokonaiskulutuksesta. Biopolttoaineiden osuus vuonna 2022 oli alle puoli prosenttia kokonaisenergiantarpeesta merenkulussa, jossa perinteisesti öljytuotteiden osuus on ollut yli 99 %. (IEA 2023.)



Kuva 2 Kansainvälisen merenkulun hiilidioksidipäästöt vuodesta 2000 (IEA, 2023)

Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen on olemassa useita eri vaihtoehtoja. Kuvaan 3 on kerätty 22 erilaista vaihtoehtoa, jotka on jaoteltu viiden eri osion alle. Nämä viisi osiota ovat rungon suunnittelu, voimantuotto ja propulsiojärjestelmät, vaihtoehtoiset polttoaineet, vaihtoehtoiset energianlähteet ja operointi. Kuvassa kiinteä palkki kuvastaa tyypillistä vähennyspotentiaalia ja ohut linja koko alkuperäistutkimuksessa olleen aineiston hajontaa. Merkityt pisteet kuvastavat yksittäisiä löydettyjä tapauksia. (Bouman et al. 2017, 413, 416.)



Kuva 3 Erilaisten ratkaisujen hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaali merenkulussa (Bouman et al. 2017, 416)

2.2 Päästöjä ohjaava regulaatio

Uusimmista kansainvälisen merenkulun päästöjen vähentämiseen tähtäävistä toimista päätettiin 3–7. heinäkuuta 2023. Päätöksen teki IMO:n alainen meriympäristön suojelukomitea

(MEPC) 80:nnessä istunnossaan ja hyväksyi vuoden 2023 IMO:n strategian laivojen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiselle. Uusi tavoite on saavuttaa merenkulussa kasvihuonekaasupäästöjen nettonollataso vuoteen 2050 mennessä ja siten olla linjassa Pariisin ilmastosopimuksen kanssa. Vuoden 2050 nettonollatavoitteeseen sisältyy osatavoite edesauttaa nolla- tai vähäpäästöisten polttoaineiden käyttöä vuoteen 2030 mennessä, sekä edistymistä seuraavien tarkastuspisteiden määrittäminen vuosille 2030 ja 2040. Tarkastuspisteissä kasvihuonekaasupäästöjä verrataan vuoden 2008 tasoon. Vuonna 2030 päästövähennyksien tavoitteena on 20 % ja pyrkimyksenä 30 % vähennykset sekä vuonna 2040 tavoitteena on vähintään 70 % vähennykset ja pyrkiä 80 % vähennyksiin. Lisäksi strategiassa kuvattiin kolme muuta tavoitetta. Ensimmäisenä tavoitteena on laivojen hiili-intensiteetin pienentäminen parantamalla uusien laivojen energiatehokkuutta. Tähän pyritään vahvistamalla energiatehokkuusvaatimuksia laivojen suunnittelussa. Toisena tavoitteena oli kansainvälisen laivaliikenteen hiili-intensiteetin pienentäminen. Tässä tavoitteena on pienentää hiilidioksidipäästöjä rahtiyksikköä kohden vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä. Kolmanneksi kasvatetaan nolla- tai lähes nollapäästöisien teknologioiden, polttoaineiden ja/tai energianlähteiden käyttöönottoa. Näiden osuus kansainvälisestä merenkulusta pitäisi olla vuoteen 2030 mennessä 5 % ja pyrkimystasona 10 %:n osuus. (IMO 2023.)

2.2.1 Energy Efficiency Design Index

EEDI (Energy Efficiency Design Index) on uusien laivojen suunnittelussa käytetty energiatehokkuusindeksi. Tämän indeksin avulla pyritään edistämään energiatehokkaampien laitteiden ja moottoreiden käyttöönottoa uusia laivoja suunnitellessa, sekä siten pienentää päästöjä. Erikokoisille ja -tyyppisille laivoille on omat minimiarvot, jotka niiden täytyy täyttää, kun mitataan energiatehokkuutta siirrettyä tavaramäärää ja etäisyyttä kohden. Täten indeksissä pienempi arvo on parempi. Vuodesta 2013 alkaen tavoitteita on kiristetty viiden vuoden välein. Indeksin tavoitteena on teknologianeutraali päästövähennys, eli käytännön ratkaisut ja keinovalikoima jätetään markkinoiden päätettäväksi ja vain tavoite on määrätty. (IMO 2019.)

2.2.2 Energy Efficiency Existing ship Index

EEXI (Energy Efficiency Existing ship Index) on kaikille yli 400 bruttovetoisuustonnin olemassa oleville laivoille käytetty energiatehokkuusindeksi. Indeksin periaate on siis ulottaa EEDI myös käytössä oleviin laivoihin. Indeksi lasketaan kerran laivalle, joka kuvastaa laivan teknistä tai suunnitteluperustaista tehokkuutta. Tämän jälkeen laivan on päästävä tavoitteena olevaan indeksilukemaan. Vastaavasti kuin EEDI:ssä, laivoilla on mahdollisuus valita teknologianeutraalisti soveltuvin keino päästövähennyksiin. Nykyisiä keinoja ovat mm. tehonrajoitukset, hukkalämmön talteenotto tai tuulen käyttö propulsiossa. (IMO 2019.)

2.2.3 Carbon Intensity Indicator

CII (Carbon Intensity Indicator) eli hiilidioksidipäästöintensiteetin indikaattori kuvastaa laivojen energiatehokkuutta, jossa otetaan huomioon vuosittainen öljypolttoaineiden kulutus. Indikaattoria käytetään kaikille laivoille, joiden bruttovetoisuus on vähintään 5000 tonnia. Vuotuista tavoitetta CII:lle vähennetään vuosina 2023–2026 kaksi prosenttia vuosittain ja edelleen vaatimuksia lisätään vuosille 2027–2030. Saavutettua CII arvoa tarkastellaan ja verifioidaan verrattuna tavoitetasoon. Arvioinnin perusteella laivalle annetaan päästöjen mukainen arvosana aakkosjärjestyksessä A-E, jossa A on paras ja E vastaavasti huonoin arvosana. Mikäli laiva saa arvion D kolmena vuotena peräkkäin, pitää laivalle tehdä korjaavien toimenpiteiden suunnitelma. Vastaavasti toimitaan, jos laiva saa arvion E. Laivat pystyvät operoinnissaan pienentämään kulutustaan esimerkiksi optimoimalla laivan nopeutta, suunnittelemalla reittejä säätietojen perusteella, paremmalla aikataulutuksella tai säätämällä laivan asentoa painolastin avulla. (IMO 2019.)

2.3 Öljypolttoaineiden korvaamisen teknologinen tilanne ja tulevaisuudennäkymät

Öljypolttoaineiden korvaaminen hiilineutraaleilla polttoaineilla vaatii teknologian kehittymistä laivakäytössä. Vertailuun on otettu kaksitahti- ja nelitahtimoottorit, kattila- sekä polttokennokäyttö. Kaksitahtimoottoreita käytetään tyypillisesti suurissa rahtilaivoissa propulsioon ja siten ne muodostavat asennusteholtaan, päästöiltään ja polttoaineen kulutukseltaan isoimman ryhmän. Kuitenkin nelitahtimoottoreita on maailmassa lukumääräisesti eniten,

noin 82 % asennetuista moottoreista. Niitä käytetään niin propulsiooon kuin myös apukoneina. Kattiloiden avulla tuotetaan höyryä laivan käyttöön ja siten ne vastaavat pientä osaa kokonaispolttoaineenkulutuksesta ja päästöistä. Polttokennojen rooli oletettavasti tulee olemaan osana sähköntuotannon hybridijärjestelmiä. (DNV 2022, 35–36.)

Taulukkoon 1 on kerätty metanolin, ammoniakin ja vedyn kannalta teknologisen sekä regulatorisen valmiuden ennuste. Teknologinen valmius on merkattu sille vuodelle, jolloin oletettavasti polttoaine on kyseisessä teknologiassa todettu toimivaksi operoinnissa. Regulaation kohdalla kyseessä on arvio vuodesta, jolloin voidaan ennustaa regulaation olevan hyvin turvallista ja kypsässä vaiheessa. Ammoniakin kohdalla kattila- tai polttokennokäytön ei uskota saavuttavan teknologista valmiutta tarkasteluaikana. (DNV 2022, 36–37.)

Taulukko 1 Teknologisen ja regulatorisen valmiuden ennuste (DNV 2022, 37)

	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
2T Moottori	MeOH			NH3							
4T Moottori			MeOH		NH3		H2				
Kattila					MeOH						
Polttokenno				H2					MeOH		
Regulaatio	MeOH						NH3				H2

2.4 Energiamurroksen tilannekatsaus laiva- ja tilauskannassa

Vuonna 2022 käytössä olevista laivoista 98,8 % operoi perinteisillä öljypolttoaineilla. Vaihtoehtoisissa polttoaineissa suosituin oli LNG, edustaen lähes 70 %:n osuutta ryhmästä. Akkusähköiset/hybridit edustivat lähes 30 % osuutta, LPG noin puolitoista prosenttia ja metanolin osuus jäi vajaaseen prosenttiin. Tarkemmat tiedot ovat nähtävissä taulukossa 2. (DNV 2022, 34.)

Taulukko 2 Käytössä olevien laivojen polttoainejakauma (DNV 2022, 34)

	%-osuus kaikista	kpl	%-osuus vaihto-ehtoisista
Öljypolttoaineiden osuus	98,8 %		
Vaihtoehtoiset	1,2 %		
- Metanoli		11	0,8 %
- LPG		19	1,4 %
- Akkusähköinen/ hybridi		396	29,4 %
- LNG		923	68,4 %
Yht.		1349	

Kun tarkastellaan tilauskannassa olevia laivoja vuonna 2022, huomataan että vaihtoehtoisten polttoaineiden osuus on kasvanut yli 20 %:iin. LNG hallitsee vaihtoehtoisten polttoaineiden sisällä n. 50 %:n osuudella ja akkusähköisten/hybridien osuus on n. 40 %. LPG:n osuus on lähes viisi ja puoli prosenttia, metanolin jäädessä kolmeen prosenttiin. Myös kolme kappaletta vetykäyttöisiä laivoja oli tilauskannassa. Tiedot on kerätty yhteen taulukkoon 3. (DNV 2022, 34.)

Taulukko 3 Tilauskannassa olevien laivojen polttoainejakauma (DNV 2022, 34)

	%-osuus kaikista	kpl	%-osuus vaihto-ehtoisista
Öljypolttoaineiden osuus	78,9 %		
Vaihtoehtoiset	21,1 %		
- Vety		3	0,3 %
- Metanoli		35	3,3 %
- LPG		57	5,4 %
- Akkusähköinen/ hybridi		417	39,9 %
- LNG		534	51,1 %
Yht.		1046	

Mikäli vertailu tehtäisiin bruttovetoisuustonneissa, olisi operoivien laivojen vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävien laivojen osuus 5,5 %. LNG ottaa tässä vertailussa lähes koko osuuden, edustaen 5,39 %:a maailman laivoista, jättäen muille vain promillen osuuksia. Tilauskantaa bruttovetoisuustonneissa tarkastellessa tilanne on lähes vastaava; vaihtoehtoisten edustaen 33,2 %:a, sekä LNG:n osuuden ollessa 30,2 %. Nyt myös LPG ja metanoli saavat

noin puolentoista prosentin osuuden, mutta akkusähköisten/hybridien osuus jää kahteen promilleen. (DNV 2022, 34.)

Alkuvuoden 2023 aikana, DNV:n Alternative Fuel Insights -portaalin mukaan 19.8.2023 mennessä, perinteisten polttoaineiden osuus tilatuista laivoista on ollut 76 % ja vaihtoehtoisten vastaavasti 24 %. Tässä vaihtoehtoisia polttoaineita ovat metanoli, LNG, LPG ja vety. Metanolin osuus oli 13 %, LNG:n osuus oli 7 %, LPG:n 3 % ja vedyn osuus jäi 0 %:iin tilatuista laivoista. (DNV 2023a.)

Vaikka AFI-portaalista tähän kerätyt tiedot eivät ota huomioon akkusähköisiä polttoaineita, kuten edellä esitetyissä taulukoissa (taulukot 2 ja 3), on polttoaineiden keskinäisessä suhteessa tapahtunut merkittäviä muutoksia. Siinä missä aiemmin tilauskannassa olleissa vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävissä laivoissa LNG on ollut hallitseva vaihtoehto, on metanoli noussut suosituimmaksi vaihtoehdoksi vuoden 2023 aikana tilatuissa laivoissa. Taulukkoon 4 on yhdistelty tietoja vuoden 2022 tilauskannasta sekä vuoden 2023 elokuun 19. päivään mennessä tilattujen laivojen tietoja. Vaikka taulukon tietoihin kohdistuu merkittävää epävarmuutta vuoden 2023 tietojen osalta, johtuen AFI-portaalin ilmaisversion tavasta ilmoittaa tietoja kokonaisina prosentteina, voidaan muutos nähdä niin sanotusti isossa kuvassa. Tämän havainnon syitä ja asettumista pitempään ajanjaksoon voi olla hyvä tutkia tulevaisuudessa. Esimerkkikysymyksiä voisi olla; onko kyseessä yksittäinen poikkeama vai jopa trendimuutos, ja johtuuko tilanne esimerkiksi muutoksista markkinassa ja/tai regulaatiossa ja sen valmistumisesta.

Taulukko 4 Metanolin, LPG:n ja LNG:n muutokset vuoden 2022 tilauskannassa olevien ja vuoden 2023 elokuuhun mennessä tilattujen välillä

Polttoaine	**Osuus vaihtoehtoisista 2022**	**Osuus vertailun kolmikosta 2022**	**Osuus tilatuista 8/2023 mennessä**	**Osuus vertailun kolmikosta 8/2023**	**Muutos**
Metanoli	3,3 %	5,5 %	13 %	54 %	+ 48,5 %-y
LPG	5,4 %	9,0 %	3 %	12,5 %	+ 3,5 %-y
LNG	51,1 %	85,5 %	7 %	29 %	- 59,5 %-y
Yht.	**59,8 %**	**100 %**	**24 % (23 %)**	**(95,5%)**	**-**

3 Metanoli

Metanoli on laajasti käytetty ja yleinen teollisuuden hyödyke, erityisesti kemian teollisuudessa. Toimitusketjut ovat jo laajasti olemassa, joten se tarjoaa helpon valmiuden meriteollisuuden polttoaineeksi. Myös nykyisin muiden nestemäisten polttoaineiden infrastruktuuria voidaan konvertoida metanolille. (ABS 2021, 5.) Metanolia on saatavilla yli 125:ssä satamassa (Methanex 2022, 32).

Kuva 4 Metanolia astiassa (Royal global energy, 2023)

Metanolia on perinteisesti tehty tislaamalla, mutta nykyään teollisessa mittakaavassa hiilimonoksidin ja vedyn synteesillä. Vety voidaan tuottaa joko uusiutuvasti tai nykyään pääsääntöisesti maakaasusta. Metanolia voidaan tuottaa myös monenlaisista biomassoista. Koska metanolissa ei ole rikkiä, sen polttaminen ei tuota rikkipäästöjä. Myös typen oksidi -päästöt ovat pienet. Moottorien hyötysuhde on yhtä suuri tai jopa suurempi kuin perinteisillä polttoaineilla. (Andersson & Salazar 2015, 17-18.)

3.1 Yleisiä käyttökohteita

Metanolia voidaan käyttää polttoaineena tai polttoaineen lisäaineena myös meriteollisuuden ulkopuolella. Tällaisia käyttökohteita ovat mm. kulkuneuvot, teolliset kattilat ja uunit, hellat sekä generaattoreiden varapolttoaineena. Muita käyttökohteita, joissa metanolia käytetään

osana toimitusketjua, on satoja. Yleisiä johdannaiskemikaaleja ovat etikkahappo, formaldehydi, metyylimetakrylaatti, alkeenit ja silikoni. Näitä käytetään mm. rakennusmateriaalien, lääkinnällisten laitteiden, vaatteiden ja tekstiilien, lääkkeiden sekä autojen valmistukseen. Lopputuotteita ovat mm. vaneri, MDF-levy, tiivistysaineet, maalit, muovit, sähkölaitteiden näytöt, tekstiilivärit ja fleece. (Methanex 2022, 9, 12, 18, 86.)

3.2 Ominaisuuksia

Metanoli on läpinäkyvä neste, joka tuoksuu alkoholille (Methanex 2023, 9). Alla olevaan taulukkoon 5 on kerätty yleisiä ominaisuuksia, joiden avulla saa karkean käsityksen aineesta, ja jotka ovat olennaisia aineen kanssa työskenteleville tai polttoainekäyttöä suunnitteleville. Erityisen kiinnostavia ovat nesteen alhainen leimahduspiste (11 °C), matala tiheys (787 kg/m^3) ja laajat syttymisrajat (5,5–36 %). Myös suhteellisen alhainen lämpöarvo (20 MJ/kg) on kiinnostava polttoainekäytössä.

Taulukko 5 Metanolin ominaisuuksia (Andersson & Salazar 2015, 18; Avinash et al. 2019, 12; Methanex 2023, 9)

Olomuoto huoneenlämpötilassa	Neste
Väri	Läpinäkyvä
Tuoksu	Alkoholi
Tiheys	798 kg/m^3
Leimahduspiste	11 °C
Itsesyttymislämpötila	464 °C
Kiehumispiste	64,7 °C
Sulamispiste	-97,8 °C
Kinemaattinen viskositeetti, 20 °C:ssa	0,74 cSt
Höyryn paine, 20 °C:ssa	12,8 kPa
Höyryn tiheys, 20 °C:ssa. (Ilma = 1)	1,1
Syttymisrajat ilmassa, tilavuus %	5,5–36,5 %
Lämpöarvo	20 MJ/kg
Hiilipitoisuus	37,49 m-%
Pysyvyys ja hajoavuus	Nopeasti biohajoava

Tarkasteltaessa polttoaineeseen sitoutuneen vedyn suhdetta hiileen, metanolilla suhdeluku on korkein nestemäisistä polttoaineista (CH_3OH). Tämä edesauttaa palamisessa tapahtuvien hiilidioksidipäästöjen vähentämistä, kun verrataan metanolia perinteisiin fossiilisiin öljypolttoaineisiin. (ABS 2021, 2.)

3.2.1 Materiaalivalinnat

Metanoli on korrosoivaa, joten se täytyy ottaa huomioon polttoainejärjestelmän materiaalivalinnoissa; esimerkiksi titaani, alumiini, lyijy ja sinkki eivät sovellu käytettäväksi metanolin kanssa (ABS 2021, 6,8; Methanex 2023, 10). Lähes kaikki teräkset sopivat käytettäväksi metanolin kanssa, aina hiiliteräksistä ja niukkaseosteisista teräksistä ferriittisiin ja martensiittisiin teräksiin. Myös valurautaiset, pronssiset ja messinkiset venttiilit soveltuvat metanolikäyttöön. (Methanol institute 2015a, 10–14.)

Muoveja, elastomeerejä tai synteettisiä kumeja valittaessa esimerkiksi tiivisteiksi on huomioitava, että muun muassa polyeteeni (PE), polyvinyylikloridi (PVC) tai nitriilit eivät sovellu käytettäväksi (Methanex 2023, s. 10). Näiden sijaan kannattaa suosia esimerkiksi EPDM ja PTFE tiivisteitä tai PVDF-muovia (Methanol institute 2015b, 10, 14).

3.2.2 Palontorjunta

Metanoli palaa matalassa lämpötilassa, lähes näkymättömällä liekillä ja ilman näkyvää savua. Usein palo havaitaankin vasta, kun palo on sytyttänyt palamaan muita aineita. Tästä syystä palotilanteet voivat olla vaarallisia ja ne vaativatkin erityiset palontorjuntaratkaisut, kuten infrapunalla toimivat palohälyttimet ja vaahtotyyppiset sammutusjärjestelmät. Perinteiset savuun perustuvat palovaroittimet vaativat toimiakseen noen muodostumista, jota ei puhtaan metanolin palaessa synny. Myöskään yhdistelmähälyttimet, joiden toiminta perustuu havaitsemaan molempia, ultraviolettivaloa yhdessä infrapunavalon kanssa, eivät sovellu metanolille. (ABS 2021, 6, 9.) Metanoli-vesi seos pystyy palamaan vielä, kun metanolia on yli 20 % seoksesta (Methanex 2023, 4).

3.2.3 Myrkyllisyys ihmisille

Metanoli on myrkyllistä ja altistuminen voi tapahtua nielemällä, hengittämällä tai ihon läpi (Andersson & Salazar 2015, 25). Metanoli vaikuttaa keskushermostoon ja voi aiheuttaa sokeutumista, kooman tai jopa kuoleman, mikäli sitä päätyy kehoon suurempia määriä. Myrkyllisyyden vuoksi metanolia pitää käsitellä varovasti ja huomioida mahdolliset nesteen vuoto- tai läikkymismahdollisuudet. Koska metanolihöyryt ovat ilmaa raskaampia, se voi aiheuttaa vaaratilanteita esimerkiksi metanolihöyryjen kasaantuessa tilojen tai tankkien pohjille. Lisäksi ilmaan höyrystyessään metanoli voi suuremmissa pitoisuuksissa aiheuttaa tukehtumisen. (ABS 2021, 6.) Taulukossa 6 on esitetty tietoa metanolin myrkyllisyydestä oraali-, dermaali- ja inhalaatioaltistuksessa LD50 ja LC50 arvoilla, sekä TWA ja STEL altistuminen. Tämän taulukon LD50 ja LC50 arvot ovat laskennallisia akuutin myrkytyksen arviorajoja perustuen metanolin riskiluokitukseen (Methanex 2023, 11).

Taulukko 6 Metanolin myrkyllisyystietoa oraali-, dermaali- ja inhalaatioaltistuksessa (Methanex 2023, 3, 7, 8)

Altistus	**Metanolin määrä**
Oraalinen LD50	100 mg/kg
Dermaalinen LD50	300 mg/kg
Inhalaatio LC50, 4h, höyry	3 mg/L
TWA	200 ppm
STEL	250 ppm
DNEL, Dermaalinen, lyhyt ja pitkä aika	20 mg/kg
DNEL, Inhalaatio, lyhyt ja pitkä aika	130 mg/m3

LD50 arvolla kuvataan annosta, joka tappaa puolet kohderyhmästä. Vastaavasti LC50 arvolla kuvataan vastaavasti hengitysilman konsentraatiota, joka tappaa puolet kohderyhmästä. (ILO 2004.) TWA kuvaa aikapainotettua altistumisen keskiarvoa, jossa on sallittua työskennellä normaali kahdeksantuntinen työaika ja 40-tuntinen työviikko. STEL arvo puolestaan kuvaa sallittua lyhyemmän ajan, 15 minuutin, altistumisen rajaa. (ILO 2023.) DNEL määrittää rajaa, jonka yläpuolisille arvoille ihmisiä ei pitäisi altistaa (REACH 2019).

Metanolin nauttiminen aiheuttaa pahoinvointia, heikotusta ja vaikuttaa keskushermostoon. Pääkipu, oksentaminen ja sekavuus kuuluvat oireisiin ja myös päihtymisoireita voi ilmetä. Kooma ja kuolema johtuvat hengityselimistön lamaantumisesta suurilla pitoisuuksilla. Altistumisen ja oireiden ilmaantumisen välillä voi olla usean tunnin viive. (Methanex 2023, 11.)

Myrkyllisyyttä voidaan tarkastella myös AEGL-arvojen, eli akuutin altistumisen raja-arvojen kautta siinä missä edellä esitetyt TWA ja STEL ovat työhygieenisiä raja-arvoja (Työterveyslaitos 2022). AEGL arvot on kehitetty ensihoitajien avuksi, silloin kun he joutuvat tekemisiin kemikaalien kanssa esimerkiksi onnettomuustilanteissa. Arvot on jaoteltu kolmeen luokkaan niiden aiheuttamien myrkytysoireiden vakavuuden mukaan. Niiden sisällä jaottelua on lisäksi eri altistumisaikoihin: 10 minuutin, 30 minuutin, yhden tunnin, neljän tunnin ja kahdeksan tunnin altistumiset. Työterveyslaitos ilmoittaa metanolille taulukossa 7 arvot 10 ja 30 minuutin altistumisille. AEGL tasolla 1 altistuminen aiheuttaa huomattavaa epämukavuutta, ärsytysoireita sekä oireettomia tai ei aistittavia vaikutuksia. Vaikutukset eivät kuitenkaan tee toimintakyvyttömäksi, ovat väliaikaisia ja palautuvia altistumisen loputtua. AEGL 2 aiheuttaa palautumattomia tai muuten vakavia ja pitkäkestoisia haittavaikutuksia sekä saattaa rajoittaa altistumisalueelta poistumiskykyä. AEGL 3 tasolla altistuminen aiheuttaa henkeä uhkaavia terveysvaikutuksia tai kuoleman. (EPA 2023.) Altistuminen 50 000 ppm / 66 000 mg/m^3 pitoisuudelle aiheuttaa kuoleman muutaman tunnin kuluessa (Työterveyslaitos 2022). Metanolin haistamisen raja-arvot ovat 4,2–5960 ppm (Methanex 2023, 9). Siten altistumisen riskin arviointi hajun perusteella ei ole hyvä vaihtoehto.

Taulukko 7 Akuutin altistumisen raja-arvot (Työterveyslaitos, 2022).

Akuutin altistumisen taso	Väliaikainen arvo
AEGL 1	670 ppm (890 mg/m^3) / 10 min
	670 ppm (890 mg/m^3) / 30 min
AEGL 2	11 000 ppm (15 000 mg/m^3) / 10 min
	4 000 ppm (5 300 mg/m^3) / 30 min
AEGL 3	40 000 ppm (53 000 mg/m^3) / 10 min
	14 000 ppm (19 000 mg/m^3) / 30 min

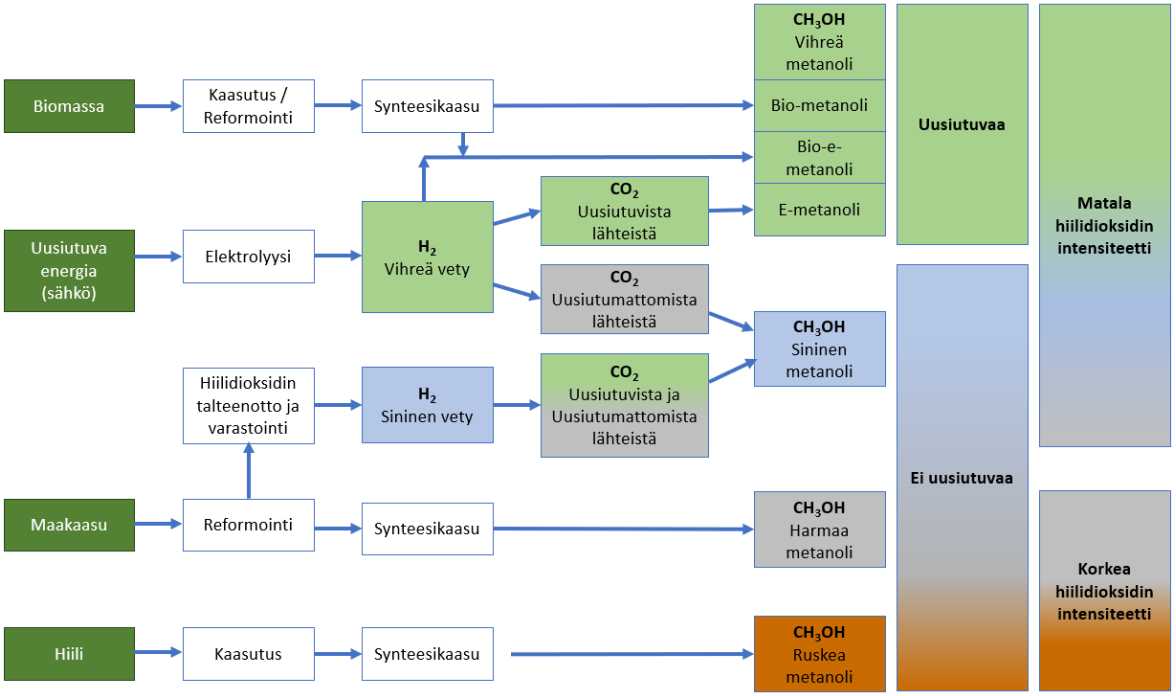
3.2.4 Suojavälineet

Metanolin käsittelyssä on syytä olla asianmukaiset suojavälineet. Methanexin metanolille tekemän käyttöturvallisuustiedotteen mukaan (Methanex 2023, 8-9) suojausta tarvitaan kasvoihin, käsiin, kehon ja hengityksen suojaamiseen sekä muita yleisiä käsittelyohjeita alla kuvatusti. Silmien suojaamiseen pitää käyttää tiiviitä suojalaseja, jotka noudattavat standardia EN 166. Käsien suojaamiseen on käytettävä soveltuvia läpäisemättömiä hanskoja, jotka on tehty butyylikumista ja jotka noudattavat standardia EN 374. Kehon suojaamiseen on käytettävä EN ISO 6529 mukaista suojavaatetusta. Hengityksen suojaamiseen pitäisi käyttää koko kasvot peittävää mallia, jossa ilmaa syötetään positiiviseen paineeseen perustuvasti. Pääsääntöisesti hengityssuojain pitää valita riskikartoituksen ja odotettujen pitoisuuksien (EN 137) mukaisesti. Yleisesti metanolia on käsiteltävä hyvien teollisuuskäytäntöjen mukaisesti. Kontaminoituneita vaatteita ei saa viedä pois työpaikalta ja ne on pestävä ennen uudelleen käyttämistä. Kädet on pestävä ennen taukoa ja välittömästi tuotteen käsittelyn jälkeen. Syöminen, juominen ja tupakointi metanolin käytön yhteydessä on kiellettyä. Käsittelytiloissa on oltava riittävä ilmanvaihto ja puhaltimien on oltava räjähdyssuojattuja sekä tiloissa on oltava silmä- ja hätäsuihku.

3.3 Metanolin tuotantotavat

Lähes kaikki metanoli nykyään tuotetaan fossiilisten polttoaineiden avulla, vaikka sitä voidaan tuottaa myös muista hiiltä sisältävistä lähteistä. Metanolin tuotanto hiileen perustuen on nykyään lähes kokonaan Kiinassa ja muualla maailmassa se on puolestaan lähes yksinomaan maakaasuun perustuvaa. Vaihtoehtoisia raaka-aineita ovat mm. biomassa, biokaasu, jätevirrat ja hiilidioksidi, esimerkiksi talteen otettuna palokaasuista tai suoraan ilmakehästä. Parhaat edellytykset biometanolin tuotantoon on erilaisista biomassoista, esimerkiksi metsäteollisuudessa tai maatalousjätteissä. Myös kaatopaikkoja, jätevesiä, kiinteää kotitalousjätettä tai mustalipeää voidaan käyttää biokaasun lähteenä. Vihreää metanolia voidaan tehdä synteettisesti, kunhan vety on tuotettu uusiutuvalla energialla ja hiili on otettu talteen ilmakehästä tai suoraan bioenergian tuottajalta. Täten uusiutuvan, vihreän metanolin, tuottamiseen tarvitaan koko tuotantoketjun olevan uusiutuvista lähteistä. Kuvassa 5 on esitetty erilaisia metanolin tuotantotapoja, ottamalla myös kantaa niiden uusiutuvuuteen ja

hiilidioksidipäästöjen intensiteettiin tuotantoketjussa. Tässä työssä käytetään vapaasti suomennettuja IRENA ja methanol institute:n termejä erilaisille metanolipolttoaineille, vaikka ne eivät välttämättä olekaan standardisoituja nimikkeitä. (IRENA ja Methanol Institute 2021, 13, 33.)

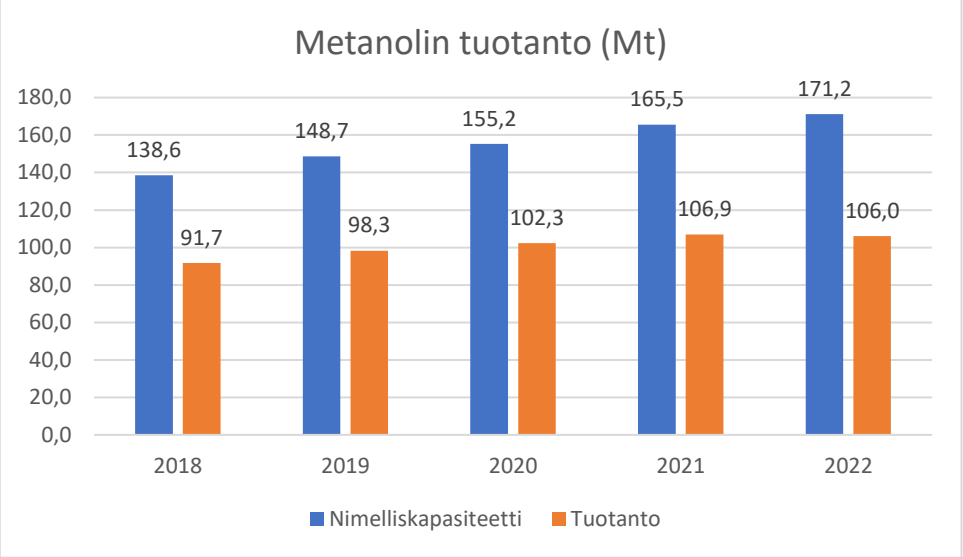


Kuva 5 Metanolin luokittelua valmistustavan mukaan (IRENA ja Methanol Institute, 2021)

Vihreän metanolin vastakohtana on ruskea metanoli, jota tuotetaan hiilen avulla. Tämän tuotantotavan hiilidioksidipäästöt ovat suurimmat. Harmaa metanoli on samaan tapaan täysin fossiilinen polttoaine, mutta sitä tuotetaan maakaasun avulla ollen samalla hieman ympäristöystävällisempää kuin ruskea metanoli. Uusiutuvan ja fossiilisen välimaastoon jää sininen metanoli, jonka tuotantotavoissa on uusiutuvia ja fossiilisia elementtejä. Sinistä metanolia saadaan, kun uusiutuvalla energialla tuotetun vihreän vedyn kanssa yhteen laitetaan fossiilisesta lähteestä olevaa hiilidioksidia. Myös maakaasusta hiilen talteenoton kanssa tehtävän, sinisen vedyn, avulla tehtävää metanolia kutsutaan siniseksi metanoliksi, hiilidioksidin lähteestä riippumatta. Vaikka sinistä metanolia ei voida pitää uusiutuvana, se on kuitenkin hiilidioksidipäästöjen osalta täysin fossiilisia vaihtoehtoja parempaa.

3.4 Nykyinen tuotanto ja tulevaisuuden näkymät

Metanolin tuotanto vuonna 2022 oli n. 106,0 Mt ja vuonna 2018 tuotanto on ollut 91,7 Mt. Kasvua on ollut tänä aikana noin 3,7 % vuodessa. Tuotantolaitosten nimelliskapasiteetti on kasvanut tarkasteluaikana hieman tätä nopeammin, n. 5,4 % vuodessa. Vuonna 2018 kapasiteetti oli 138,6 Mt ja vuonna 2022 se oli jo 171,2 Mt. Metanolin tuotannon ja kapasiteetin kehityksestä lisätietoja voi nähdä kuvasta 6. Vuonna 2023 nimelliskapasiteetti on arviolta n.183 Mt ja tuotanto n. 109 Mt. (MMSA, 2022.) Tuotetusta metanolista n. 65 % valmistetaan maakaasun avulla ja käytännössä loput valmistetaan hiilestä. Vain noin 0,2 % metanolista on uusiutuvaa. (IRENA ja Methanol Institute 2021, 32.)



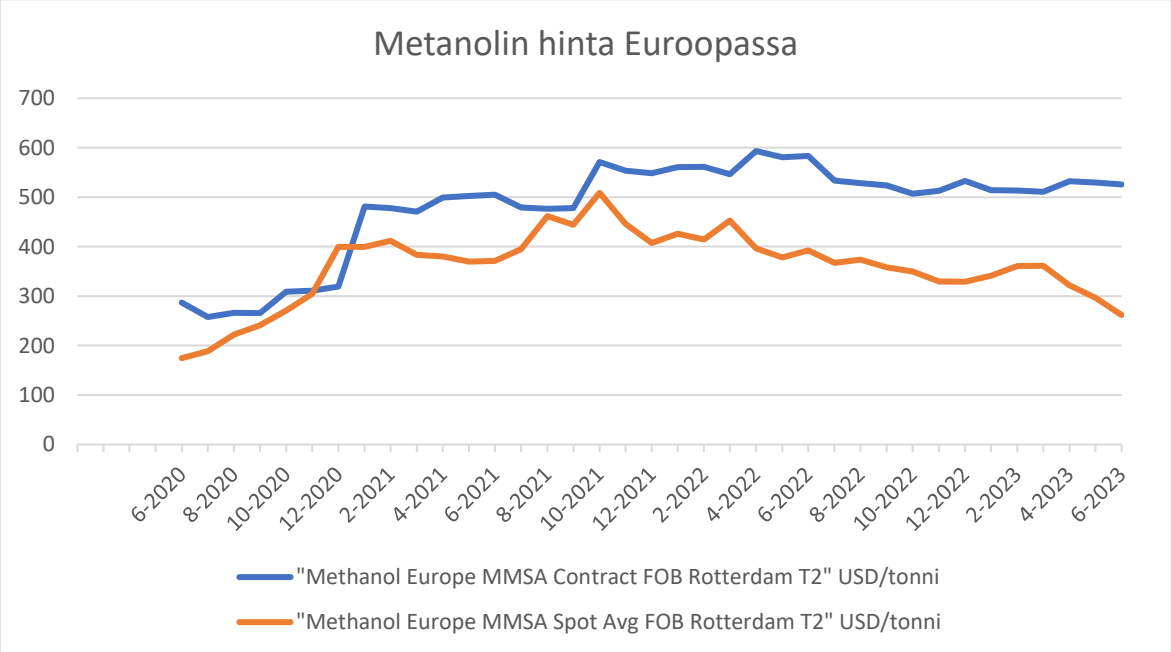
Kuva 6 Metanolin tuotantomääriä ja -kapasiteetteja 2018-2022 (MMSA, 2022)

Vuoteen 2050 mennessä metanolin tuotannon on ennustettu nousevan 500 Mt/a vuoden 2020 tuotannon tasosta 100 Mt/a. Nykyisin lähes kaikki tuotanto on fossiilisista lähteistä, mutta vuonna 2050 arviolta 135 Mt/a olisi biometanolia ja 250 Mt/a olisi e-metanolia. Tällaisen e-metanolimäärän tuottamiseen tarvittaisiin arviolta 350 Mt hiilidioksidia ja 48 Mt vetyä, jonka tuottamiseen puolestaan elektrolyysillä tarvittaisiin 2 400 000 GWh sähköä. Tämä vastaa 275 GW:n jatkuvaa sähköntuotantoa, sekä 280 GW:n elektrolyysikapasiteettia. Uusia e-metanolin tuotantolaitoksia, kapasiteetilta arviolta 0,9Mt/a, tarvittaisiin noin 280 kappaletta. Investointina tämä olisi arviolta 500 miljardia, perustuen CRI:n Norjassa sijaitsevan

laitoksen kustannuksiin. Ennusteen mukaisen 135 Mt biometanolin tuottamiseen tarvittaisiin vuosittain n. 230 Mt kuivaa biomassaa ja tyypillisen laitoksen koon ollessa noin 300kt/a, vaadittaisiin noin 450 uutta laitosta. Tällainen määrä biometanolilaitoksia vaatisi noin 130 miljardin Yhdysvaltain dollarin investoinnit. (IRENA ja Methanol Institute 2021, 84, 89.)

3.5 Hinnan kehitys ja markkinan koko

Metanolin spot-hinta Euroopassa on viimeisen kolmen vuoden aikana ollut alimmillaan 2020 kesäkuussa 175 USD/t ja korkeimmillaan 509 USD/t lokakuussa 2021. Sopimushinnan taso on ollut korkeampi minimin ollessa 258 USD ja maksimin 593 USD/t. Minimisopimushinta tarkastelujaksolla oli vastaavasti kesällä 2020, mutta heinäkuussa ja maksimisopimushinta oli huhtikuussa 2022. Vuonna 2021 spot-hinnan keskiarvo oli 415 USD/t ja sopimushinnan 504 USD/t. Keskiarvohinnat vuonna 2022 olivat vastaavasti 381 USD/t ja 547 USD/t. Tarkemmin hintakehitystä on nähtävissä kuvasta 7. (MMSA, 2023.)



Kuva 7 Metanolin hinta Euroopassa 6/2020-6/2023 (MMSA, 2023)

Metanolimarkkinoiden koko vuonna 2021 oli arviolta 37,04 miljardia dollaria. Markkinan odotetaan kasvavan vuoteen 2030 mennessä keskimäärin 5,83 % vuodessa 61,7 miljardiin

dollariin. Markkinoiden kasvua tukee metanolin polttoainekäyttö erilaisissa kulkuvälineissä, myös sekoitteena ja DME:n valmistuksessa. Koronapandemian aiheuttama laaja-alainen hidastuminen on ollut nähtävissä markkinassa. Haasteena kasvulle on mm. kysyntään vaikuttava hinnanvaihtelu ja metanolin valmistuksen hinnan nousu. Myös muuttuva regulaatioympäristö aiheuttaa haasteita toimialalla. (GlobeNewswire, 2022.)

3.6 Metanoli suhteessa muihin polttoaineisiin

Dieselin ja polttoöljyn käytöllä on pitkät perinteet merenkulussa ja vakiintuneet käytänteet sekä regulaatio. Päinvastoin uuden sukupolven polttoaineilla regulaatio on vielä tuoretta tai enemmän kehitysvaiheessa, sekä näitä polttoaineita käyttävät laivat ovat selkeässä vähemmistössä polttoaineen yleisyyden kannalta.

3.6.1 Polttoaineiden systeemitason teknistä vertailua polttomoottorikäytössä

Taulukossa 8 on esitetty vertailua e-metanoliin, vetyyn, e-ammoniakkiin ja raskaaseen polttoöljyyn polttomoottorikäyttöä ajatellen. Taulukon numerointi on tehty skaalalla, jossa numero yksi tarkoittaa suurinta riskiä tai huonointa ominaisuutta ja numero viisi tarkoittaa pienintä riskiä tai parasta ominaisuutta. Ammoniakin kohdalla, kasvihuonepäästöissä, alkuperäinen lähde on tunnistanut epävarmuutta typen oksidien päästöissä. Vedyn ympäristöriskit ovat arvioitu pienimmiksi ja e-metanolilla ne ovat lähes yhtä pienet. Infrastruktuuri taulukossa sisältää tuotantolaitokset ja bunkrausmahdollisuudet. (Wissner et al. 2023, 7–8.)

Taulukko 8 Ei biologista alkuperää olevien uusiutuvien polttoaineiden vertailua raskaaseen polttoöljyyn (Wissner et al. 2023, 8)

Kriteeri	**E-Metanoli**	**Vety**	**E-Ammo-niakki**	**Raskas polttoöljy**
Kasvihuonekaasupäästöjen vähennyspotentiaali elinkaaren aikana	5	5	4	1
Päästöt ilmaan, sis. pakokaasujen käsittelyn	4	5	5	1
Myrkyllisyys merielämälle	5	5	2	1
Myrkyllisyys ihmisille	3	5	2	3
Syttyvyys	2	1	2	5
Räjähdysriskit	5	2	4	5
Infrastruktuuri	4	1	3	5
Teknologinen valmius	3	1	2	5

Edellä esitettyyn taulukkoon esitetty pisteytys antaa e-metanolille 31 pistettä, vedylle 25 pistettä, e-ammoniakille 24 pistettä ja raskaalle polttoöljylle 26 pistetä. Vaikka yksittäisten pisteiden perusteiden kyseenalaistaminen voisikin olla helppoa, on pisteyttäminen auttamatta yksi hyvä keino hahmottaa eri polttoaineiden antamia erilaisia haasteita. Omaa kieltään polttoaineiden vertailun haastavuudesta kertoo myös yhteispisteiden hyvin pieni eroavaisuus. Lisäksi, vaikka polttoöljy onkin teknisesti (kokonaispisteissä) hyvin samalla tasolla oleva vaihtoehto, ollaan siitä pyrkimässä eroon juuri kahden ensimmäisen, päästöjä käsittelevän rivin vuoksi. Täten vertailua voisi olla hyvä tehdä aihealueittain (riveittäin), tai kehittämällä vastaaviin vertailuihin aihealuekohtaisia painotuksia.

3.6.2 Metanolin ja dieselin palamisen vertailua polttomoottorissa

Metanolin lämpöarvon ollessa alle puolet dieselin 42,7 MJ/kg:sta, polttoainetta ja siihen tarvittavaa varastointitilavuutta tarvitaan enemmän. Puristussytytteisissä moottoreissa käytettäessä yksi tärkeimmistä polttoaineen ominaisuuksista on polttoaineen itsesyttymislämpötila. Metanolilla itsesyttymislämpötila on 464 °C ja dieselillä se on 240 °C. Korkeampi

itsesyttymislämpötila mahdollistaa korkeammat puristussuhteet ja siten myös termodynaamisesti tehokkaamman moottorin. Metanolin höyrystymisenergian ollessa nelinkertainen dieseliin nähden, metanoli tuottaa suuremman jäähdytysvaikutuksen ja siten parantaa moottorin termistä hyötysuhdetta ja parantaa antotehoa. (Avinash et al. 2019, 11–13.)

Koska metanolissa on itsessään mukana happea, se mahdollistaa pienemmät häkä- ja typenoksidipäästöt sekä lisäksi palaminen on täydellisempää. Polttoaineessa ei myöskään ole rikkiä, joten rikin oksidipäästöjä ei metanolin palamisessa synny. Setaaniluvun ollessa alle viiden, on se hyvin pieni verrattuna perinteiseen dieseliin ja siten vaikeuttaa tasaisen palamisreaktion aikaansaamista. Metanolilla on vaatimattomat voiteluominaisuudet sekä alhainen viskositeetti. Näiden vuoksi metanoliin pitäisi sekoittaa lisäaineita tai käyttää sitä yhdessä dieselin kanssa, jotta polttoaineesta saadaan sopivaa puristussytytteiselle moottorille. (Avinash et al. 2019, 13.)

Metanoli-diesel-kaksoispolttoainemoottorin termistä hyötysuhdetta voidaan parantaa sekoittamalla metanolipolttoaineeseen vettä. Veden lisääminen auttaa myös typen oksidi -päästöjen sekä polttoainekustannusten pienentämisessä. (Dierickx et al. 2022.)

3.6.3 Polttoaineiden säilyttämisestä ja energiasisällöstä

Vetyä on esitetty energiankantajaksi, koska sen polttamisessa syntyy ainoastaan vettä. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin sen huono energiatiheys, jonka vuoksi vety pitää joko paineistaa korkeisiin, 350–700 bar, paineisiin tai jäähdyttää hyvin matalaan, -253 °C, lämpötilaan. Tämän vuoksi säilytys muodostuu ongelmaksi ja energiaintensiiviseksi, sekä siten vaadittavasta jakeluinfrastruktuurista tulee hyvin kallis. Vedyllä on myös ominaisuus läpäistä useita yleisesti käytettäviä metalleja ja materiaaleja. Se on myös helposti syttyvää ja räjähtävää. (IRENA ja Methanol Institute 2021, 57.)

Myös LNG ja nesteytetty ammoniakki pitää säilyttää kylmissä olosuhteissa 1 bar paineessa; LNG:llä säilytyslämpötila on -162 °C ja ammoniakilla -34 °C. Ammoniakki voidaan vaihtoehtoisesti pitää nestemäisenä myös 10 bar paineessa lämpötilan ollessa 20 °C. Metanoli puolestaan on nestemäisenä huoneen lämpötilassa, eikä vaadi jäähdytystä tai paineistamista. Myös sen energiatiheys vertautuu LNG:hen, mikäli säilytyksen tilavaraukset otetaan huomioon. Nykyinen polttoaineinfrastruktuuri voidaan päivittää metanolille verrattain edullisilla

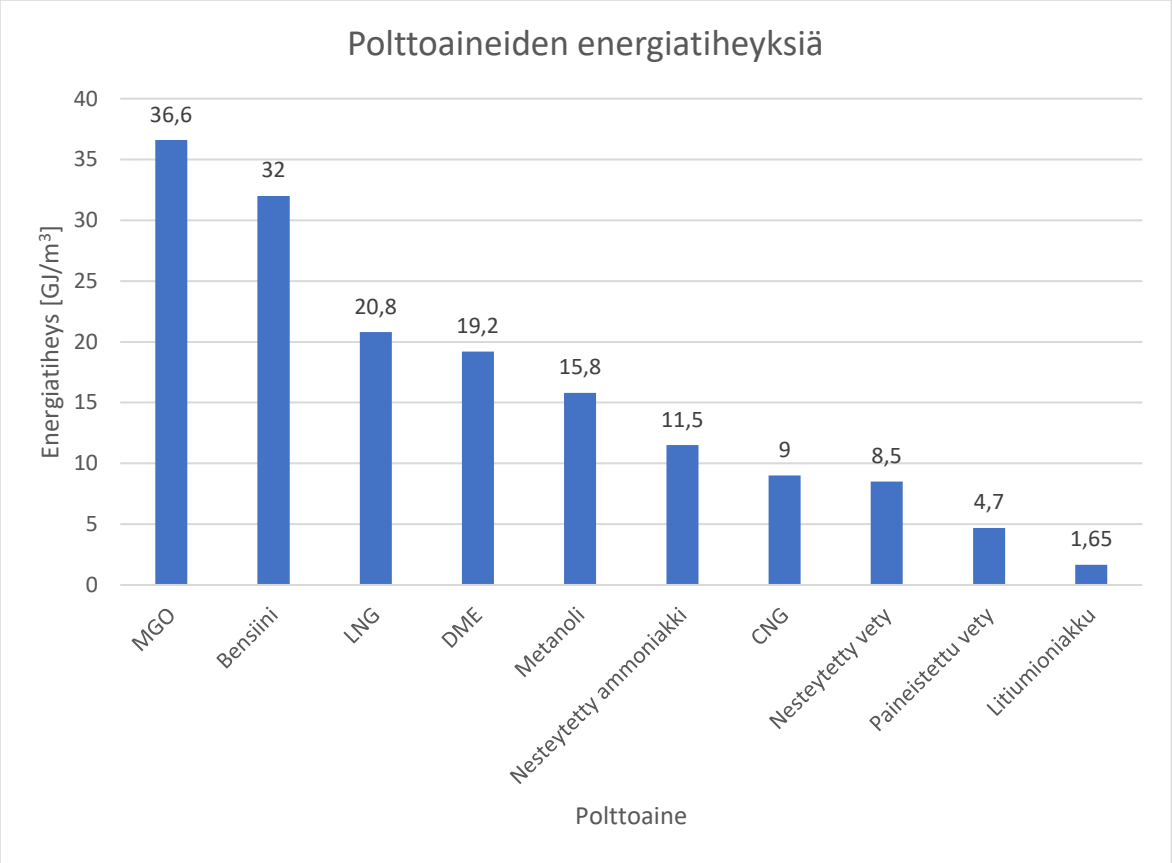
ja pienimuotoisilla muutoksilla. Polttoaineiden energiasisältöjä ja -tiheyksiä eri säilytysolosuhteissa on listattu taulukkoon 9. (IRENA ja Methanol Institute 2021, 57.)

Taulukko 9 Polttoaineiden energiasisältöjä ja -tiheyksiä eri säilytysolosuhteissa (IRENA ja Methanol Institute 2021, 57)

Polttoaine	**LHV [MJ/kg]**	**Energiatiheys [GJ/m^3]**	**Säilytyspaine [bar]**	**Säilytyslämpötila [°C]**
Metanoli	19,9	15,8	1	20
DME	28,9	19,2	5	20
LNG	48,6	20,8	1	-162
CNG	48,6	9	250	20
Nesteytetty ammoniakki	18,6	11,5	1	-34
			10	20
Nesteytetty vety	120	8,5	1	-253
Paineistettu vety	120	4,7	700	20
Bensiini	43,4	32	1	20
MGO	42,8	36,6	1	20
Litiumioniakku	0,4–1	0,9–2,4	1	20

Laivoissa on yleisesti pulaa tilasta ja sen takia polttoaineiden kohdallakin on mielenkiintoista tietää niiden vaatima tila. Luonnollisesti pienemmän energiatiheyden polttoaine vaatii isomman tilan yhtä pitkän matkan kulkemiseen, kuin suuremman energiatiheyden polttoaine. Toisesta näkökulmasta; mitä suurempi tila tarvitaan laivan liikuttamiseen, sitä vähemmän tilaa jää hyötykuormalle. Polttoaineiden energiatiheyttä on visualisoitu taulukossa 10. Taulukosta nähdään, että esimerkiksi tieliikenteessä tapahtuvan sähköistymisen kautta tutuksi tullut matkarajoite on huomattava verrattuna esimerkiksi bensiiniin. Taulukkoon on otettu yllä esitetyn tiedon pohjalta litiumioniakun energiatiheyden keskiarvo, joka on noin kahdeskymmenesosa bensiiniin verrattuna. Pelkästään energiatiheys kuitenkaan ei itsessään kerro kaikkea tilavaatimuksista, sillä eri polttoaineilla on erilaisia käyttöön ja oheisjärjestelmiin liittyviä vaatimuksia. Näitä käsitellään tässä työssä tarkemmin metanolin kohdalla myöhäisemmissä luvuissa.

Taulukko 10 Polttoaineiden energiatiheyksiä suurimmasta pienimpään (IRENA ja Methanol Institute 2021, 57)



Ammoniakin säilytyksessä pitää huomioida sen olevan korrosoivaa, myrkyllistä sekä mahdollisuuden muodostaa räjähtävän seoksen ilmassa. Ammoniakki on räjähtävää 16–25 %:n seoksena (Airgas 2019, 6). Tankin materiaali voi olla hiiliterästä tai CrNi(Mo)-terästä ja ammoniakin aiheuttamaa jännityskorroosiota voidaan välttää lisäämällä polttoaineen sekaan 0,1-0,2 % vettä. Mikäli säiliöön tulee reikä tai repeämä, ammoniakkia vuotaa osin kiehuvana nesteenä ja osin höyrynä. Höyry on valkoista, koska ammoniakki absorboi ja reagoi ilmassa olevan veden kanssa. Kaasupilvi on aluksi raskas ja viileä, mutta vaiheittain hajoaa tuuleen, lämpenee ja siitä tulee kelluvaa ilmassa. Vuonna 1973 Potchefstroomissa, Etelä-Afrikassa, 38 tonnia vedetöntä ammoniakkia vuoti pääosin höyrynä aiheuttaen 18 kuolemaa ja 65 loukkaantumista. Neljä kuolemista sattui asuinalueella 150–200 metrin etäisyydellä vuotopaikasta. Polttoainekäytön lisäksi ammoniakkia käytetään esimerkiksi lannoitteissa. (Pasman 2015, 6, 11.)

LNG koostuu pääosin metaanista, jolla on hiilivetyjen pienin molekyylimassa sekä niistä vähiten reaktiivinen. Maakaasusta puhdistetaan pois epäpuhtauksia, yleensä mm. elohopeaa

ja rikkiä, ennen käyttöä. Palamisesta johtuvat räjähdysonnettomuudet tapahtuvat yleensä suljetuissa tiloissa. Toisaalta esimerkiksi korkeapaineisten putkien räjähdykset ovat alkujaan fyysisiä repeytymistyyppisiä räjähdyksiä, joita seuraa suihkumainen liekki. Vuototilanteissa LNG kiehuu rajusti muodostaen kylmän kaasupilven, joka lähtee tuulen mukaan hitaasti lämmeten ja nousten ylöspäin. Metaani-ilma kaasu on syttyvää ja räjähtävää 5–15 % seoksena. (Pasman 2015, 17.)

3.6.4 Sähköpolttoaineiden tuotannon hyötysuhteista

Hiiltä sisältävillä, ei-biopohjaisilla uusiutuvilla polttoaineilla tuotannon hyötysuhteet ovat tyypillisesti nykyään noin 40–50 %. E-metanolin tuotannon kokonaisenergiatehokkuuteen vaikuttavat elektrolyysin, vesikaasuprosessin ja hiilidioksidin talteenoton teknologioiden tulevaisuuden kehitys. Tällä hetkellä e-metanolin tuotannon hyötysuhde on arviolta 41–45 % ja pitkällä aikavälillä 56 %. E-dieselillä vaihteluväli on nykyään noin 37–45 % ja e-metaanilla noin 46–48 %. E-ammoniakilla hyötysuhteet ovat korkeammat kuin hiilipohjaisilla; nykyään noin 53 % ja jopa 60 % tulevaisuudessa. Tämä johtuu siitä, ettei prosessissa luonnollisestikaan tarvita hiilidioksidin talteenottoa ja prosessissa on vähemmän vaiheita. (Wissner et al. 2023, 10.) Sähköpolttoaineesta käytetään myös nimitystä e-polttoaine tai synteettinen polttoaine.

3.6.5 Vuotojen haitallisuus meressä

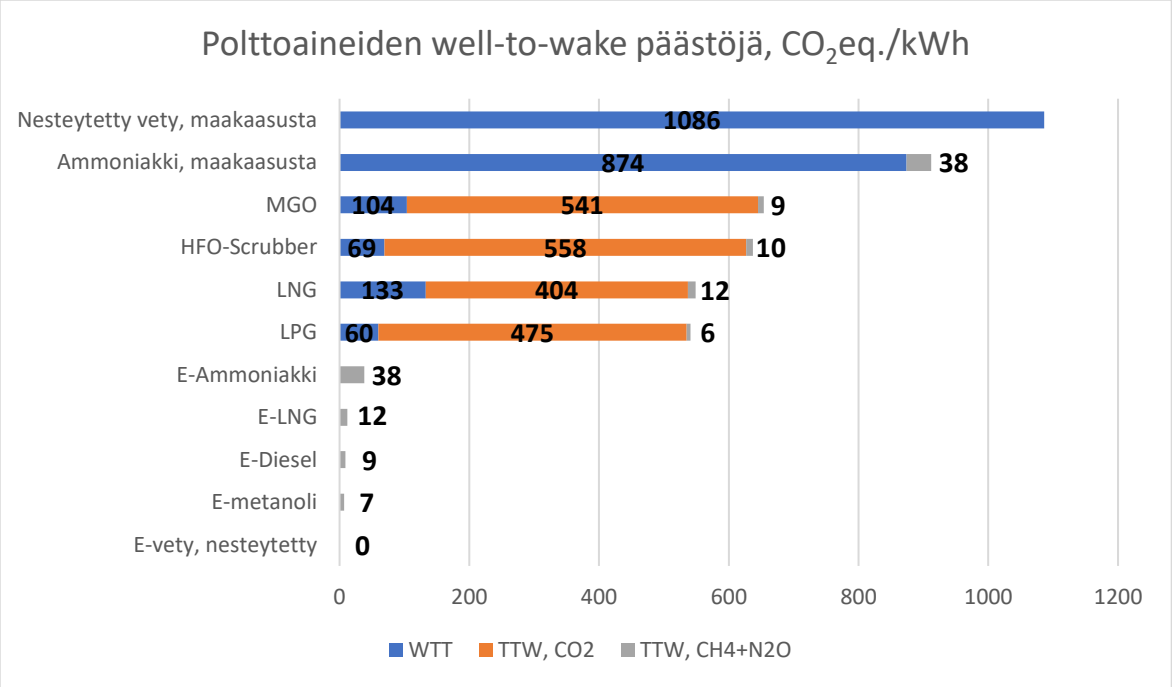
Ympäristön kannalta metanoli on huomattavasti turvallisempi vaihtoehto kuin esimerkiksi öljy, sillä metanoli liukenee veteen ja hajoaa nopeasti. Monet mikro-organismit voivat käyttää metanolia hyödyksi, joten mahdollisten suurten metanolin vuototilanteiden ympäristövaikutukset jäävät paljon rajallisemmiksi verrattuna öljyvuotoon. (Andersson & Salazar 2015, 8.) Altistuspitoisuuksia, joissa puolet kaloista kuolevat, on kerätty taulukkoon 11. Huomionarvoista on mittaustavan luoma, lähes kahden sadan kerroin metanolipitoisuudelle verrattuna perinteisesti laivaliikenteessä käytettyyn raskaaseen polttoöljyyn. Tietokonesimulaatiolla on esitetty, että 10 000 tonnin metanolipäästö mereen liudentuisi tunnissa 0,36 %:iin (Wissner et al. 2023, 24).

Taulukko 11 LC50 pitoisuuksia eri polttoaineille (Methanol institute 2023, 12)

Polttoaine	**LC50 annos [mg/l]**	**Kerroin raskaaseen polttoöljyyn**
Ammoniakki	0,068	0,00086
Bensiini	8,2	0,10
Metaani	49,9	0,63
Diesel	65	0,82
Raskas polttoöljy	79	1
Metanoli	15400	~195

3.6.6 Elinkaaren aikaiset päästöt eri polttoaineilla

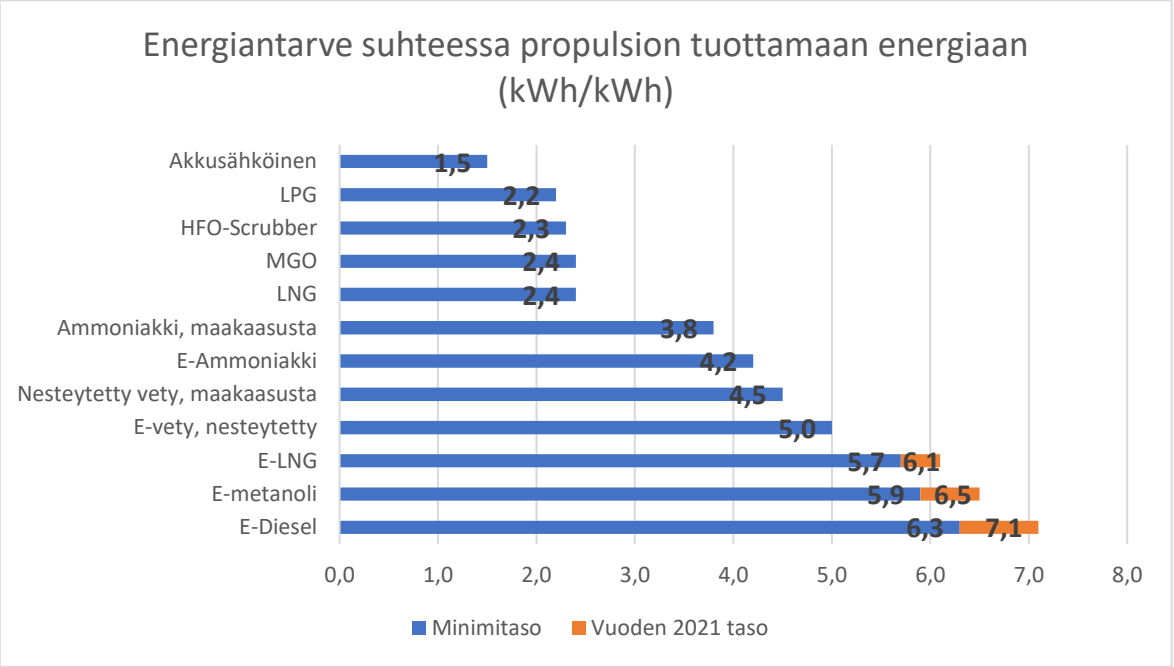
Sähköpolttoaineilla voidaan päästä parhaimmillaan jopa täysin päästöttömään tilanteeseen, kun ajatellaan energiantuotantoketjua alusta aina laivan liikuttamiseen saakka (WTW eli Well-To-Wake päästöt). Koska sähköpolttoaineiden tuotanto tehdään nimensä mukaisesti sähköllä, on polttoaineen valmistus yhtä puhdasta kuin sen tekemiseen käytetyn sähkön tuotanto. Kuvaan 8 on kerätty joidenkin e-polttoaineiden elinkaaripäästöjä, sekä vertailun vuoksi tietoja erilaisista fossiilisista polttoaineista. Kuvassa sinisellä on merkitty päästöt tuotannosta tankkiin (well-to-tank), oranssilla hiilidioksidipäästöt tankista propulsioon sekä harmaalla muut kasvihuonepäästöt tankista propulsioon. Muut päästöt on muutettu vastaamaan hiilidioksidin päästöjä ilmakehässä sadan vuoden ajanjaksolla. E-LNG:n päästöt koostuvat palamattomasta metaanista; ongelma on vastaava kuten fossiilisella maakaasulla. E-ammoniakilla suurin selittäjä on typen oksidi -päästöt. Huomionarvoista on myös se, että mikäli ammoniakkia ja vetyä tuotetaan maakaasusta, ovat kasvihuonekaasupäästöt 40–66 % korkeammat kuin MGO:lla prosessien muuntohäviöistä johtuen. Fossiilinen LNG pienentää kasvihuonepäästöjä n. 16 % verrattuna MGO:hon. (Lindstad et al. 2021, 5, 7.)



Kuva 8 Polttoaineiden WTW ja WTT tietoja (Lindstad et al. 2021)

3.6.7 Polttoaineiden elinkaaren energiankäytön kertoimia

Polttoaineiden keskinäisiä suhteita voidaan tarkastella myös energiankäytön osalta. Kuvaan 9 on kerätty tietoa siitä, kuinka paljon energiaa tarvitaan eri polttoaineiden kohdalla valmistuksesta propulsioon. Kuvion perusteella on nähtävissä akkusähköisen järjestelmän vaativan vain puolitoista kertaa alkuperäisen energiamäärän potkuritehon saavuttamiseen, joten sitä olisi hyvä suosia tilanteissa, joissa sen käyttö on mahdollista. Fossiiliset polttoaineet saavat tarkastelussa n. 2,2–2,4 kertoimia, lukuun ottamatta maakaasusta tehtyjä ammoniakkia ja nesteytettyä vetyä. Esimerkiksi MGO:n arvoon on päästy olettamalla kaksitahtimoottorin käyvän noin 50 % hyötysuhteella sekä energiaa kuluvan myös öljyn poraukseen, jalostukseen ja kuljetukseen. Sähköpolttoaineista parhaan arvon saa E-ammoniakki, jota kuluu 4,2 kertaa propulsion vaatima energia, toisaalta eniten energiaa sähköpolttoaineiden valmistamiseen menee hiilivedyillä, noin 6,1–7,1 kertainen määrä kulutettuun nähden. Teknologian kehittymisen myötä kertoimien uskotaan näiden osalta tippuvan 5,7–6,3 kertaisiksi. Sähköpolttoaineiden käyttö vaatii noin 2–3 kertaisen energiamäärän fossiilisten polttoaineiden käyttöön nähden. (Lindstad et al. 2021, 7.)



Kuva 9 Energiantarve suhteessa propulsion tuottamaan energiaan, kWh/kWh (Lindstad et al. 2021)

Tällä hetkellä ei ole olemassa selkeitä maakohtaisia ohjearvoja elinkaaren mukaisten päästöjen arvioimiseen, vaikka sille olisi tarvetta. Päästöjen arvioimiseen vaikuttaa esimerkiksi polttoaineen käytön maantieteellinen sijainti, polttoaineen lähtömaa, kuljetuksen aiheuttamat päästöt, polttoaineen tuotantoteknologia sekä käyttötapa. Esimerkiksi Etelä-Koreassa käytetyn LNG:n WTW-päästöt ovat matalimmillaan 74,25 g/CO_2 eq./MJ, kun polttoaine on tuotu Australiasta ja käytetty matalanopeuksisessa, korkeapaineisella polttoaineen syötöllä varustetussa kahden polttoaineen moottorissa. Korkeimmillaan arvo on 87,85 g/CO_2 eq./MJ, kun LNG on tuotu Yhdysvalloista ja käytetty matalanopeuksisessa, matalapaineisella polttoaineen syötöllä varustetussa kahden polttoaineen moottorissa. (Seungman et al. 2023.)

3.6.8 Elinkaarihintoja eri polttoaineille laivatyypeittäin

Tarkasteltaessa erilaisten polttoaineiden kustannuksia polttomoottorikäytössä koko elinkaaren ajalta, sisältäen säilytyksen ja propulsiojärjestelmän, biopolttoaineilla päästään lähimmäksi MGO:n kustannuksia. Kaikkia uusiutuvia tarkasteltaessa hintaero elinkaaren aikana on 2–6 kertaa MGO:n aiheuttamat kustannukset. Tarkat tiedot erilaisten, ja erilaisilla reiteillä, toimivien laivojen elinkaarikustannuksista on kerätty kuviin 10 ja 11. Kaikissa

tarkastelussa mukana olleissa tilanteissa metanoli muodostuu edullisimmaksi vaihtoehdoksi MGO:lle, ammoniakin ja DME:n täydentäessä kolmen halvimman joukon. Elinkaaren aikana polttoaineen hinta muodostuu hallitsevimmaksi komponentiksi, edustaen yli 50 % kustannuksista. Ainoastaan akkusähköisessä järjestelmässä varastointi muodostuu suurimmaksi komponentiksi, kun taas muiden polttoaineiden kohdalla varastointijärjestelmän aiheuttamat elinkaarikustannukset jäävät pieniksi. Polttoainevalinnasta huolimatta, polttomoottori muodostuu vastaavaa polttokennojärjestelmää edullisemmaksi jokaisella tarkastelussa mukana olleista vaihtoehdoista. Isojen lauttojen kohdalla akkusähköisestä järjestelmästä tulee sähköpolttoaineita edullisempi vaihtoehto. Muiden laivojen osalla tarkastelua ei ole tehty, sillä pidemmillä reiteillä akkusähköinen järjestelmä kohtaa vielä haasteita hinnan, koon ja akuston aiheuttaman painon vuoksi. (Korberg et al. 2021, 2, 7–8.)

Kuvissa elinkaarikustannuksien taustaväri on ryhmien sisällä jaoteltu vihreästä punaiseen, vihreän tarkoittavan pienintä elinkaarikustannusta ja punaisen vastaavasti suurinta. Esimerkiksi kuvan 10 ensimmäinen ryhmä ovat biopolttoaineet isoissa lautoissa ja lyhyellä operointimatkalla. Kustannukset ovat miljoonia euroja (Korberg et al. 2021, 7–8).

		Isot lautat						Yleisrahtialukset					
Käyttö /Matkan pituus		Lyhyt		Keskipitkä		Pitkä		Lyhyt		Keskipitkä		Pitkä	
Propulsio		Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno
MGO		0,9		1,7		2,4		1,3		1,5		1,8	
Biopolttoaineet	Miometanoli	2,0	4,2	3,9	5,7	5,7	7,2	3,0	3,8	3,7	4,4	4,6	5,1
	Bio-DME	2,3		4,2		6,2		3,3		4,0		4,9	
	Biodiesel	2,7		5,2		7,6		4,0		4,8		5,8	
	Bio-LMG	3,0	4,9	5,4	6,8	7,8	8,7	4,2	4,8	5,1	5,6	6,2	6,6
	Bio-LBG	2,8	4,8	5,1	6,6	7,4	8,4	4,0	4,6	4,8	5,4	5,9	6,4
	HVO	2,4		4,6		6,8		3,6		4,3		5,2	
Bio-e-polttoaineet	E-biometanoli	2,6	4,7	4,9	6,6	7,3	8,5	3,8	4,5	4,7	5,2	5,8	6,1
	E- bio-DME	2,9		5,4		7,9		4,1		5,0		6,2	
	E-biodiesel	3,2		6,2		9,2		4,8		5,8		7,0	
	E-bio-LMG	3,6	5,4	6,6	7,8	9,6	10,2	5,1	5,6	6,2	6,5	7,7	7,7
	E-bio-LBG	3,6	5,3	6,5	7,7	9,5	10,1	5,1	5,5	6,1	6,5	7,5	7,7
E-polttoaineet	E-metanoli	3,3	5,3	6,5	7,8	9,7	10,3	5,0	5,5	6,1	6,3	7,6	7,5
	E-DME	3,7		7,0		10,3		5,4		6,5		8,0	
	E-diesel	4,3		8,4		12,5		6,5		7,8		9,5	
	E-LMG	4,3	5,9	8,0	8,9	11,8	11,9	6,2	6,4	7,6	7,6	9,3	9,0
	Ammoniakki	3,7	5,5	6,9	8,0	10,2	10,6	5,3	5,6	6,4	6,5	8,0	7,8
Nesteytetty vety		4,7	5,3	8,8	8,6	13,0	11,9	7,0	6,5	8,7	8,0	11,0	9,9
Sähkö / Akusto		2,8		5,5		8,3							

Kuva 10 Isojen lauttojen ja yleisrahtialusten kokonaiskustannukset, miljoonaa euroa (Korberg et al. 2021, 7)

		Bulkkialukset						Konttialukset					
Käyttö /Matkan pituus		Lyhyt		Keskipitkä		Pitkä		Lyhyt		Keskipitkä		Pitkä	
Propulsio		Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno	Polttomoottori	Polttokenno
MGO		3,2		3,7		4,4		13,5		16,1		17,5	
Biopolttoaineet	Miometanoli	7,2	9,7	8,9	11,3	11,3	13,3	30,9	39,7	38,4	46,3	42,4	49,9
	Bio-DME	7,7		9,5		11,8		33,2		40,9		45,1	
	Biodiesel	9,1		10,9		13,2		39,8		48,3		52,6	
	Bio-LMG	9,9	11,9	12,2	13,8	15,0	16,3	42,4	48,9	52,5	57,9	58,5	63,2
	Bio-LBG	9,4	11,4	11,6	13,3	14,3	15,7	40,3	47,0	49,9	55,6	55,6	60,7
	HVO	8,2		9,8		11,9		35,8		43,4		47,3	
Bio-e-polttoaineet	E-biometanoli	9,0	11,4	11,1	13,2	14,0	15,7	39,0	46,9	48,2	55,1	53,1	59,5
	E- bio-DME	9,6		11,8		14,6		41,7		51,2		56,4	
	E-biodiesel	11,0		13,1		15,9		48,0		58,3		63,5	
	E-bio-LMG	12,1	13,8	14,7	16,1	18,2	19,2	51,8	57,4	64,0	68,3	71,0	74,5
	E-bio-LBG	11,9	13,6	14,5	16,0	17,9	18,9	51,1	56,7	63,1	67,5	70,0	73,7
E-polttoaineet	E-metanoli	11,7	13,8	14,3	16,1	17,9	19,3	50,8	57,6	62,7	68,1	68,9	73,7
	E-DME	12,4		15,1		18,7		54,0		66,3		72,9	
	E-diesel	14,8		17,7		21,5		64,7		78,7		85,8	
	E-LMG	14,5	16,0	17,7	18,8	21,8	22,4	62,6	67,1	77,2	80,1	85,4	87,4
	Ammoniakki	12,5	14,2	15,4	16,8	19,3	20,2	53,9	59,3	66,3	70,4	73,1	76,4
Nesteytetty vety		16,6	16,5	21,4	20,7	27,5	26,2	71,4	70,2	90,8	87,6	102,6	98,2

Kuva 11 Bulkki- ja konttialusten kokonaiskustannukset, miljoonaa euroa (Korberg et al. 2021, 8)

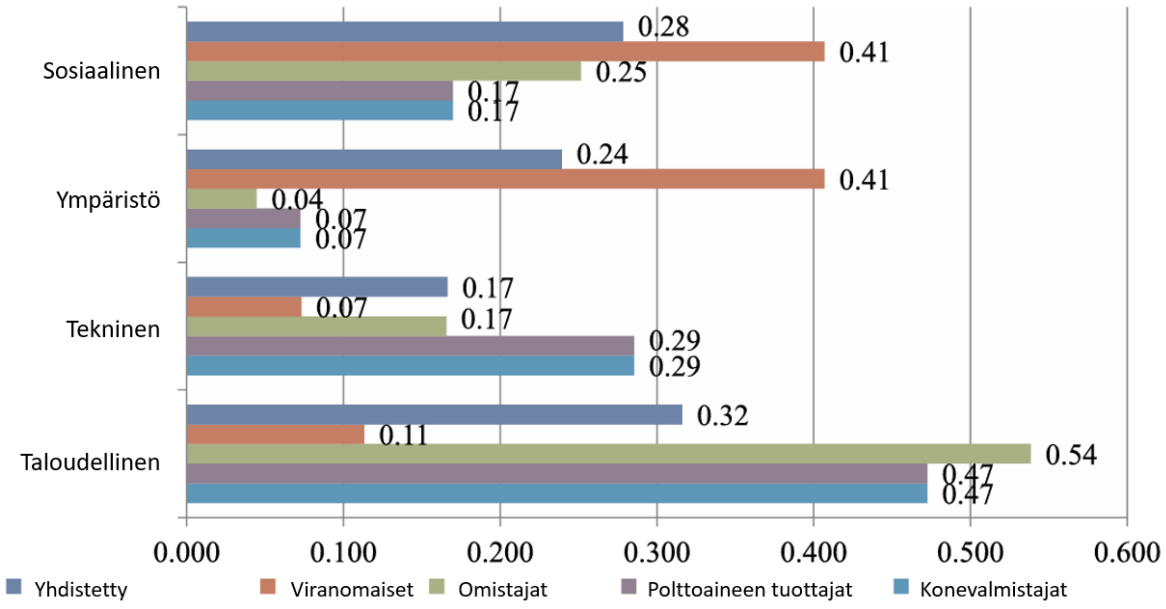
3.6.9 Polttoaineiden vastuullisuuden arviointi

Tällä hetkellä polttoaineiden valintaan tähtäävä ympäristö on monimutkainen ja siinä on paljon epävarmuuksia. Siten on muodostunut tarve tuelle päätöksen tekemisessä. Yleisimmät polttoainevalinnassa käytetyt arviointikriteerit ovat sääntelyn ohjeet, elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt, polttoaineen hinta, ilmansaasteet sekä työpaikan terveys ja turvallisuus. Laajempaa tarkastelua voi tehdä taloudellisen, ekologisen ja sosiaalisen vastuullisuuden näkökulmista. Näiden alaisia kriteereitä on listattu taulukkoon 12. Listattujen kriteerien avulla tehdyllä tarkastelulla voidaan saada aikaan holistinen käsitys polttoaineen vastuullisuudesta ja eri sidosryhmien näkökulmista. Tarkastelu voi auttaa polttoainevalinnan arvioinnissa ja edelleen mahdollistaa ympäristöön, yhteiskuntavastuuseen ja hyvään hallintotapaan liittyvien investointien ja projektien raportoinnissa. Näillä arvioidaan olevan merkittävä vaikutus tulevaisuudessa. (Ashrafi 2022, 1, 15.)

Taulukko 12 Meripolttoaineiden vastuullisuuden arvioinnin kriteerejä (Ashrafi 2022, 9)

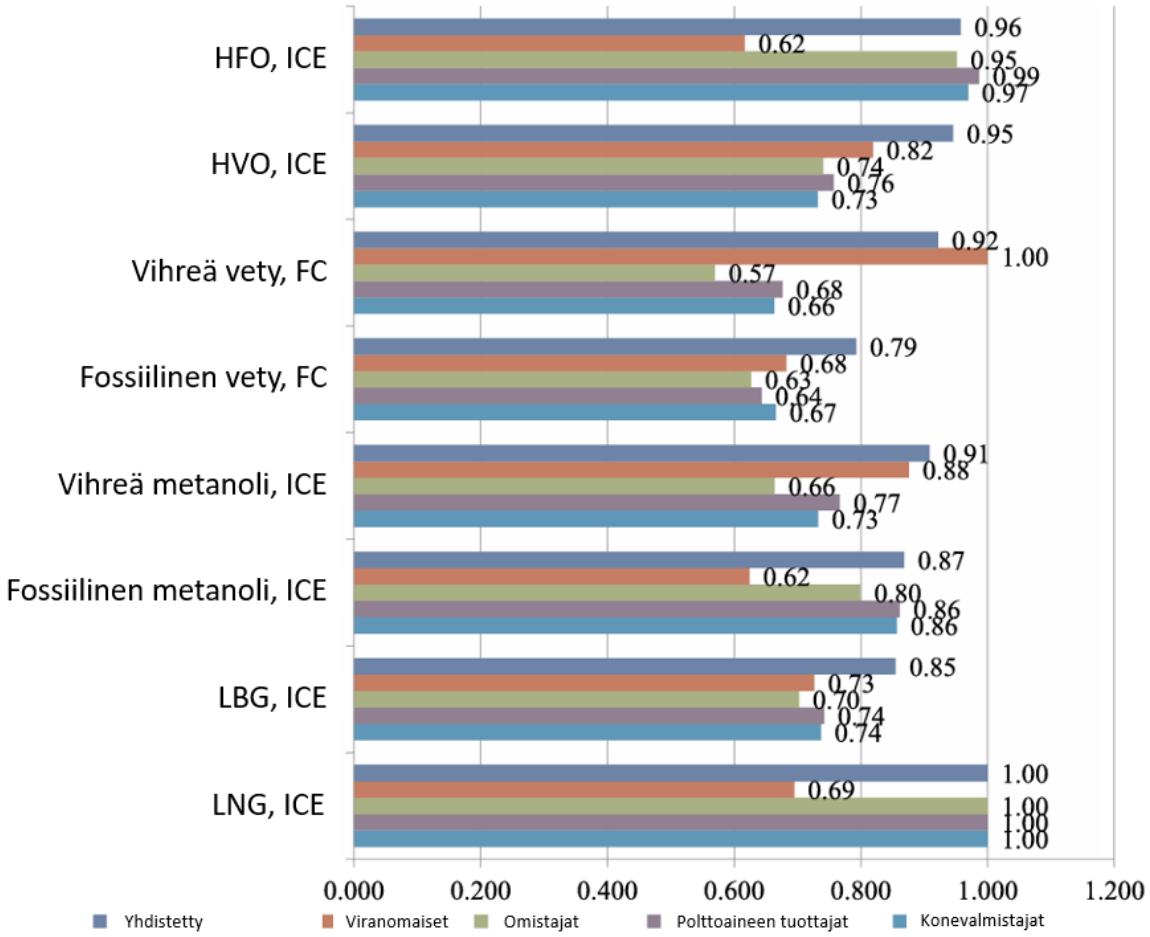
Meripolttoaineiden vastuullisuus		
Taloudellinen	**Ekologinen**	**Sosiaalinen**
Pääomakustannukset	Elinkaaren CO_2 päästöt	Regulaation noudattaminen
Operointikustannukset	Ilmansaasteet	Sosiaalinen hyväksyttävyys
Polttoainekustannukset	Meren happamoituminen	Etiikka ja sosiaalinen vastuu
Hyötykuorman pienenemisen kustannukset	Ekosysteemien rapautuminen	Yleiset terveysvaikutukset
Turvallisuusriskien aiheuttamat kustannukset	Luonnonvarojen ehtyminen	Työn terveysvaikutukset ja turvallisuus
Mahdolliset sääntelyn sakot tai kustannukset	Maankäytön muutokset	Sosioekonominen kehitys

Eri sidosryhmillä on erilainen painotus erilaisiin polttoainevalintaan liittyviin osatekijöihin, kuten voidaan nähdä kuvasta 12. Kuvan perustana olevassa tutkimuksessa selvitystä on tehty Ruotsalaisille sidosryhmille. Taloudellinen näkökulma on kokonaisuuden kannalta tärkein, sekä omistajille, polttoaineen tuottajille ja konevalmistajien alaryhmille. Taloudellisuuden jälkeen näille kolmelle ryhmälle sosiaalinen ja tekninen näkökulma ovat seuraavaksi tärkeimmät. Viranomaiset päinvastoin arvostavat eniten sosiaalisia ja ympäristöön liittyviä näkökulmia, taloudellisten tullessa kolmantena. Yhdistettyä ryhmää tarkastellessa taloudellisista osakriteereistä tärkein oli polttoaineen hinta, teknisistä polttoaineen saatavuus, ympäristön osalta ilmastonmuutos ja sosiaalisesta näkökulmasta tuleva lainsäädäntö. (Hansson et al. 2019, 162,165.)



Kuva 12 Eri vastuullisuusnäkökulmien suhteellinen tärkeys eri sidosryhmille (Hansson et al. 2019, 165)

Eri polttoaineiden houkuttelevuuksia eri sidosryhmille on listattu kuvaan 13. Yhdistettyjen ryhmässä houkuttelevimmaksi on tullut LNG ja HFO, uusiutuvista houkuttelevimmaksi tuli HVO. Viranomaisnäkökulmasta houkuttelevin vaihtoehto on vihreä vety, vihreä metanoli ja HVO. Fossiilisten polttoaineiden takana tärkeimmäksi osatekijäksi muodostui polttoaineen hinta. Artikkelin kirjoittaja oli tunnistanut ajankohdalle tyypillisen LNG:n ja HFO:n (scrubbereiden kanssa) käytön sekä kolmanneksi nouseen metanolin, laivan omistajien, konevalmistajien ja polttoaineen tuottajien keskuudessa. Ruotsalaisesta perspektiivistä mainitsemisen arvoiseksi muodostui myös ajankohtainen Stena Linen yhden laivan metanolikonversio. Vihreä vety sai parhaimmat arvosanat tulevan lainsäädännön, polttoaineen tuotannon luotettavuudessa ja ympäristökriteereissä, jonka vuoksi on ymmärrettävää viranomaisten antama korkea arvosana. Yksittäin tarkasteltuna muiden sidosryhmien näkökulmasta se valuu kuitenkin heikoimmaksi vaihtoehdoksi fossiilisen vedyn kanssa. Tämä johtuu korkeasta polttoaineen hinnasta sekä investointi- ja käyttökuluista. (Hansson et al. 2019, 164–166.)



Kuva 13 Eri sidosryhmien näkemys polttoaineiden vastuullisuudesta, suurin arvo on yksi ja loput siitä laskettuja suhteellisia arvoja (Hansson et al. 2019, 166)

Polttoaineiden vastuullisuutta ja houkuttelevuutta yleisestikin on haastavaa arvioida, sillä maailma muuttuu nopeasti. Tämän viimeisen Ruotsin sidosryhmien perusteella tehdyn tutkimuksen jälkeen kasvihuonepäästöjen vähennystavoitteet ovat tiukentuneet ja myös metanolista on tullut uusissa laivoissa LNG:tä houkuttelevampi vaihtoehto, kuten näimme kappaleessa 2.4. Joka tapauksessa on hyvä, että polttoainevalintoja tarkastellaan useasta eri näkökulmasta, mutta kuten edellä nähtiin, taloudelliset päätökset ohjaavat valintoja. Tämä on hyvin ymmärrettävää kapitalismiin perustuvassa järjestelmässä. Siten esimerkiksi polttoaineiden hintojen muuttaminen uusiutuvien eduksi lienee kokonaisvastuullisuuden ja vihreän siirtymän kannalta avainasemassa.

4 Regulaation asettamat rajoitukset aihealueittain

Tässä kappaleessa esitellään erilaisia metanolipolttoainejärjestelmän ominaispiirteitä. Tätä varten tarkasteltiin DNV:n (DNV 2023b) ja IMO:n (IMO 2020) sääntökohtia ja niistä pyrittiin tunnistamaan konseptitason suunnitteluun vaikuttavat ns. isot linjat, jotka ovat aina samalla tavalla. Asioita on esitetty kuvamuodossa mahdollistaen niiden helpomman ja nopeamman käsittelyn. Näiden tässä työssä esitettyjen tietojen lisäksi on huomattava määrä yksityiskohtia, jotka täytyy ottaa huomioon suunnittelua tehtäessä ja polttoainejärjestelmän suunnittelufilosofiaa valitessa.

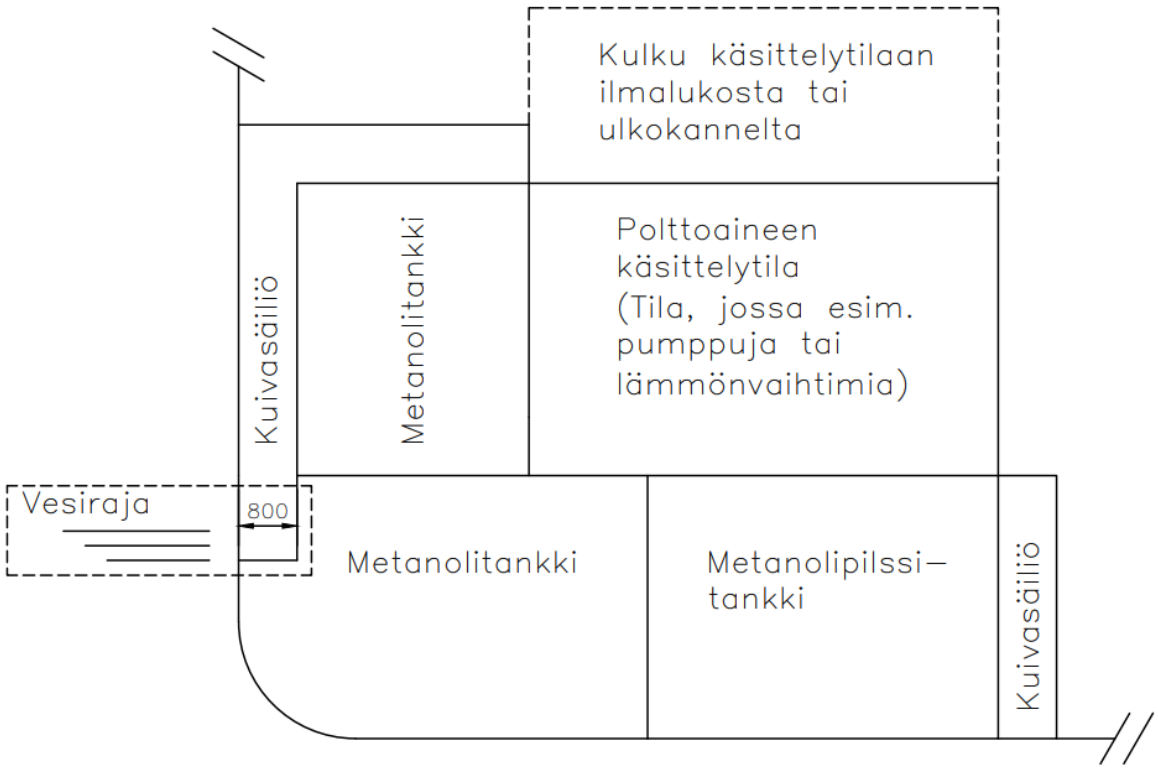
4.1 Sääntöjen tavoitteet ja filosofia

Tarkasteltu säännöstö sisältää ohjeet niin metanoli- ja etanolipolttoaineelle. Lisäksi DNV:n säännöstöstä löytyy myös viittauksia ja ohjeita bensiinin käyttöön. Periaatteellisella tasolla metanolipolttoainejärjestelmän pitää olla turvallisuuden, luotettavauuden ja käyttövarmuuden osalta samalla tasolla kuin perinteisten öljypolttoaineiden järjestelmien. Sääntöjen tavoitteena on tuottaa turvallinen ja ympäristöystävällinen suunnittelu, rakenne ja operointi metanolia polttoaineena käyttäville laivoille. Näiden avulla pyritään minimoimaan riskejä laivaa, miehistöä tai ympäristöä kohtaan polttoaineen ominaisuudet huomioon ottaen. Mikään yksittäinen vika tai turvatoiminto ei saa johtaa hyväksymiskelvottomaan tehon menetykseen laivassa. Käytännön tasolla luokituslaitos asettaa vaatimuksia mm. suunnitteluaineistolle ja laitteiden sertifioinnille. Suunnittelun aikana on tehtävä riskiarvio ja käyttöä varten laivalla on oltava käyttömanuaali, huolto- sekä harjoitusohjelma.

4.2 Tankit ja järjestely

Konseptisuunnittelun alkuvaiheessa on erittäin tärkeää tiedostaa eri tilojen ja niiden välisten suhteiden asettamat rajoitukset. Tässä tarkastelu on tehty puhtaasti metanolijärjestelmien osalta. Yleisjärjestelyn tekemisessä ja tankkien määrityksessä on kuitenkin useita eri ulottuvuuksia, kuten esimerkiksi laivan muiden järjestelmien vaatimukset ja vakavuuteen liittyvät tarkastelut.

Kiinteiden ja osan rungosta muodostavien metanolitankkien ympärille on järjestettävä kuivasäiliöt (eng. cofferdam). Kuivasäiliöiden koolle ei ole asetettu varsinaisia säännöksiä, mutta evakuointia varten kuivasäiliön kulkuaukolle on asetettu rajoituksia. Mikäli kulku on horisontaalisesti, pitää kulkuaukon olla 600mm x 600mm tai 600mm x 800mm, mikäli kulku on vertikaalisesti. Tiloissa pitää pystyä myös suorittamaan erilaisia toimintoja, esimerkiksi tarkastuksia tai evakuointeja. Kuivasäiliötä ei tarvita, mikäli tankin rajapinnassa on toinen metanolitankki tai polttoaineen käsittelytila (eng. fuel preparation space tai fuel preparation room). Tila lasketaan käsittelytilaksi, mikäli siellä on jotakin metanolin polttoainekäyttöä valmistavia laitteita, kuten esimerkiksi pumppuja tai lämmönsiirtimiä. Metanolitankit pystytään sijoittamaan myös kaksoispohjaan laitaa vasten. Öljytankkeja ei isoissa laivoissa pystytä nykyään enää vastaavasti sijoittamaan (IMO 2022). DNV kieltää metanolitankkien sijoittamisen kaksoispohjaan kuitenkin omissa säännöissään kemikaalitankkereiden osalta. Metanolitankkeja tai niitä suojaavia kuivasäiliöitä ei saa sijoittaa laivassa perä- tai keulapiikkiin. Kuvassa 14 on esitetty tankkien ja tilojen keskinäisille suhteille asetettuja vaatimuksia.



Kuva 14 Polttoainetankkien, kuivasäiliöiden ja polttoainekäsittelytilan tilasuhteet

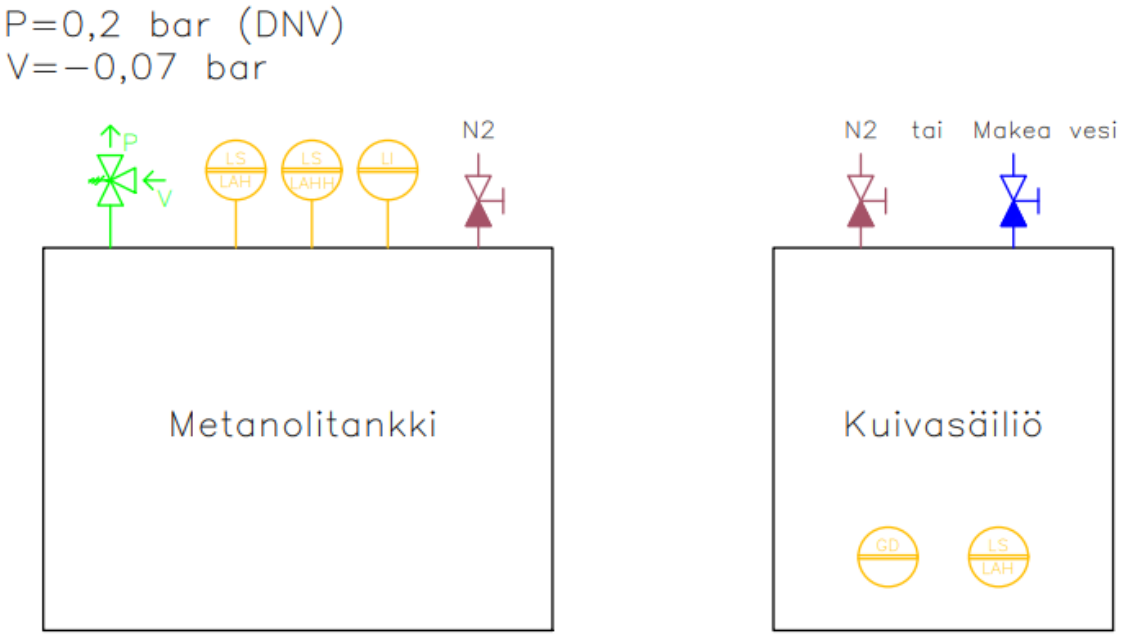
Metanolitankit tai muukaan metanolipolttoainejärjestelmän osa ei saa sijoittua 800 mm lähemmäs laitaa, paitsi silloin kun ne ovat alimman mahdollisen vesirajan alapuolella. Kuvassa 14 on esitetty edellä mainittujen lisäksi myös metanolipilssitankki. Tässä on ajateltu sen olevan tankki, johon kerätään mahdolliset metanolivuodot tai valutetaan tyhjäksi osia putkistosta. Koska tankki sisältää metanolipolttoainetta, sitä koskevat tässä kontekstissa samat rajoitukset kuin normaalejakin polttoainetarkoituksessa käytettäviä metanolitankkeja. Metanolitankkeja ei saa sijoittaa A-luokan konetiloihin tai majoitustiloihin.

Polttoaineen käsittelytila ei tarvitse ympärilleen kuivasäiliötä. Kulku tähän tilaan on järjestettävä joko ulkokannelta tai ilmalukon kautta. Ilmalukkoa käsitellään myöhemmin tässä työssä.

Metanolitankkien ja kuivasäiliöiden varustukselle on joitakin oleellisia vaatimuksia, jotka on hyvä ottaa huomioon aikaisessa vaiheessa. Metanolitankit on normaalisti pidettävä inertoituna koko operoinnin ajan. Tätä varten metanolijärjestelmä voi vaatia laivaan erillisen inerttijärjestelmän, mikäli sellaista ei ole aiemmin laivassa tarvittu. Jotta inertti pysyy tankissa, on tankille järjestettävä erillinen paine/vakuumiventtiili. Tämän venttiilin avautumispaine alipaineen puolella ei saa olla alle -0,07 bar (g). Ylipaineen puolella IMO ei ole määrittänyt avautumispainetta, mutta DNV vaatii sen olevan vähintään 0,2 bar (g). Tankkien pintaa pitää myös pystyä seuraamaan ja estämään tankin ylitäyttö. Ylitäytön estäminen on osa metanolijärjestelmän turvavaatimuksia. Turvallisuustoimenpiteet ovat myös yksi kokonaisuus, jonka olemassaolo on syytä huomioida hyvissä ajoin metanolikonseptia tarkastellessa.

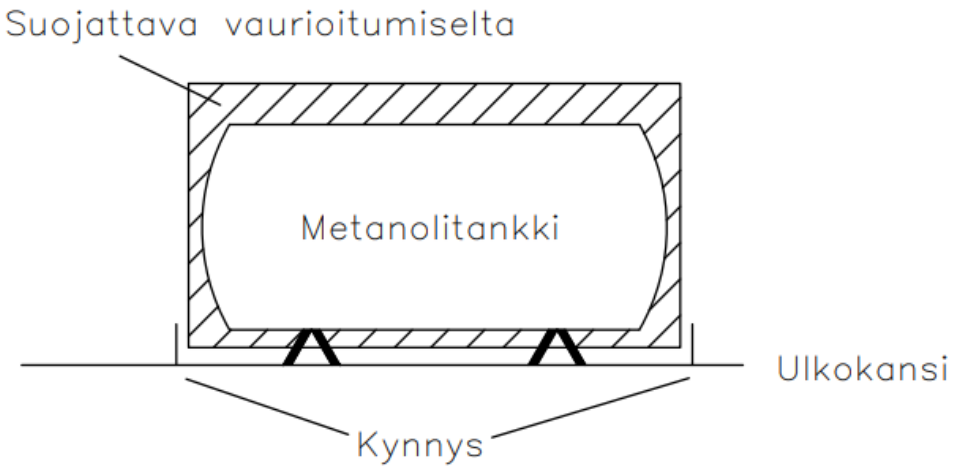
Kuivasäiliöille on myös omat oleelliset vaatimuksensa. Mikäli runkotankki vuotaa kuivasäiliöön, on vuoto pystyttävä havaitsemaan vuotoanturien ja kaasunhaistelujärjestelmän avulla. Vuototilanteessa kuivasäiliötä pitää pystyä joko inertoimaan, tai laimentamaan metanoli veden avulla. Tila on luonnollisesti pystyttävä myös tyhjentämään.

Tankkien ja kuivasäiliöiden oleelliset varustukset ovat nähtävissä kuvassa 15. Molempien tilojen osalta on myös kyettävä tekemään ne tarvittaessa ihmiselle turvalliseksi. Tämä aiheuttaa vaatimuksia muun muassa tuuletukselle.



Kuva 15 Metanolitankin ja kuivasäiliön oleellinen varustus

Metanolia voi säilyttää runkotankkien lisäksi myös erillistankeissa, joita ei lasketa rungoksi. Nämä voivat olla esimerkiksi irtotankkeja tai kiinteästi asennettuna ja sijoitettuna kannelle. Kaikkia tankkeja koskevat kuitenkin samat turvallisuusperiaatteet. Kannelle asetetuilla tankeilla on omat erityispiirteensä; ne pitää esimerkiksi suojata vaurioitumiselta sekä ympyröidä kynnyksillä vuotojen leviämisen rajoittamiseksi. Kansitankki on esitetty kuvassa 16.



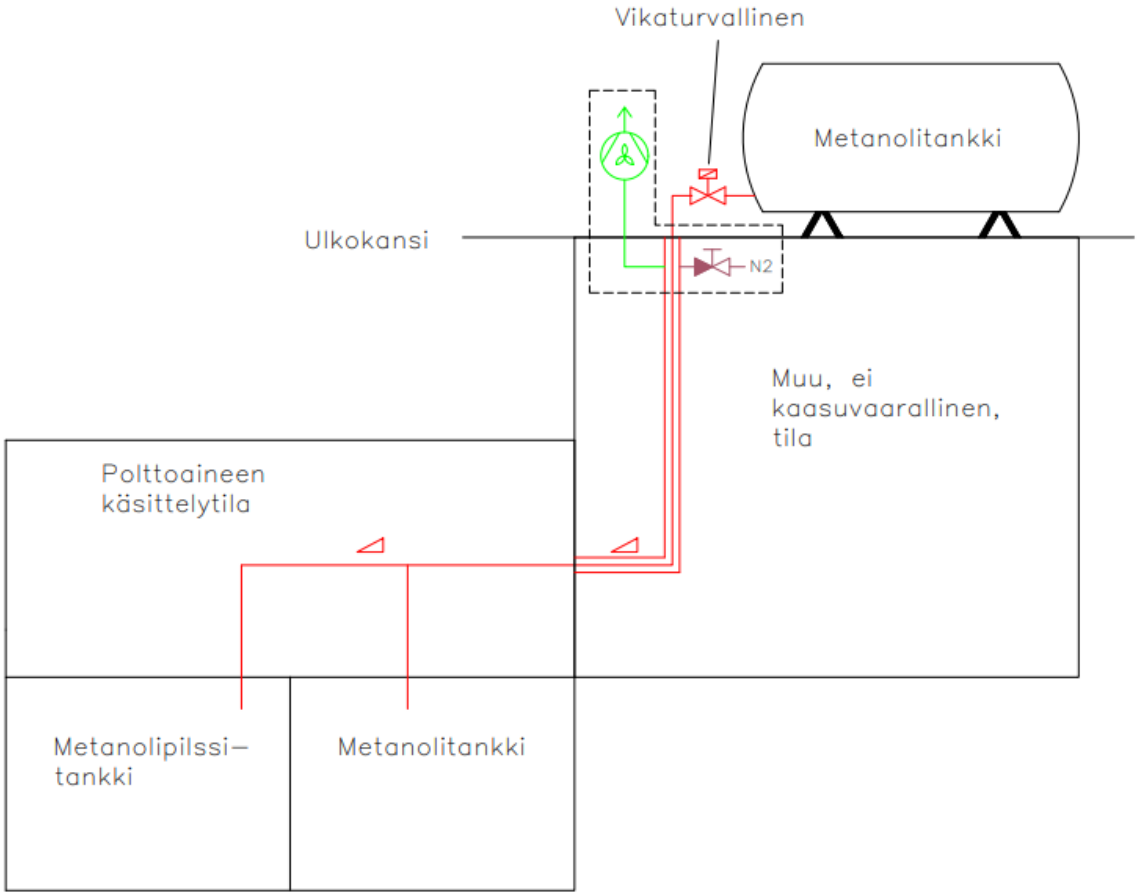
Kuva 16 Tankki ulkokannella

Kuten edellä on esitetty, on tilojen varaamisessa metanolikäyttöön käytettävä huolellista pohdintaa, sillä tankkitilat ja polttoaineen käsittelytilat vaativat ympärilleen suojatiloja. Mikäli nämä tilat on asetettu rungon sisään, myös ilmalukot lohkaisevat yleisjärjestelystä oman tilansa. Toisaalta taas kaksoispohjan käyttäminen polttoaineelle voi auttaa tilan tehokkaammassa käyttämisessä. Tätä ei voida soveltaa muille vaihtoehtoisille polttoaineille, kuten esimerkiksi ammoniakille, LNG:lle tai vedylle, koska niitä on säilytettävä jäähdytettynä tai paineistettuna ja siten paineastioissa. Tilojen tehokkaan käytön kannalta olisi järkevää sijoittaa kaikki polttoainetilat mahdollisimman lähelle toisiaan ja näin minimoida ympäröivien kuivasäiliöiden vaatimat tilat.

4.3 Polttoaineputkiston vaatimukset

Polttoaineputkistolle on asetettu säännöissä tiettyjä vaatimuksia, jotka on syytä ottaa huomioon hyvissä ajoin suunnitteluprosessissa. Putkistojärjestelmä pitää ensinnäkin olla erillinen laivan muihin järjestelmiin nähden. Lisäksi polttoaineputkisto pitää suunnitella siten, että se voidaan lähtökohtaisesti painovoimaisesti valuttaa tyhjäksi johonkin polttoaine tai keräilytankkiin. Kuvassa 17, jossa putkiston vaatimuksia on esitetty, tämä on oletettu olevan metanolipilssitankki.

Mikäli polttoaineputkisto kulkee suljetussa tilassa jossakin muualla kuin kaasuvaarallisella alueella, on se rakennettava kaksoisseinämäisestä putkesta. Tämä putkiston välitila on pystyttävä joko tuulettamaan tai vaihtoehtoisesti pitämään inertoituna. Putkiston rakenteelle ja valmistukselle on asetettu myös joitain vaatimuksia. Oleellisimpia näistä on sisäputkelle, tai missä polttoaineputki on yksiseinämäistä, asetettu vaatimus suosia päittäishitsausta laippaliitosten sijaan ja kaikille hitsisaumoille asetettu kuvausvaatimus. Ulkoputkelle kuvausvaatimus kohdistuu 10 %:iin hitsisaumoista. Ulkoputken suunnittelupaineen on lähtökohtaisesti vastattava sisäputken suunnittelupainetta. DNV on määrittänyt polttoaineputkelle minimissään kymmenen bar:n suunnittelupaineen, samalla kun IMO:n säännöstö ei tähän ota kantaa. Kaikki putket on myös kyettävä saattamaan turvalliseen tilaan. Putkistossa tarvittavien venttiilien tulee olla sellaisia, että vikatilanteessa ne menevät turvalliseen tilaan.



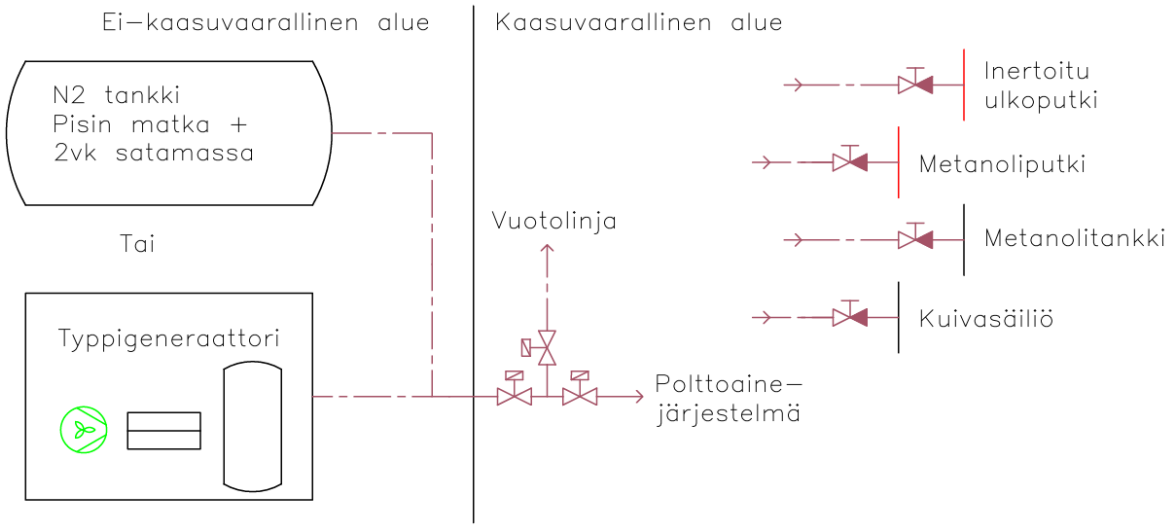
Kuva 17 Polttoaineputkiston vaatimuksia

Putkireitityksen kannalta on suotavaa pitää putkivedot mahdollisimman lyhyenä, suosia ulkotiloja, välttää turvallisten alueiden läpi menemistä sekä pitää erilliset putkilinjat minimissään. Näillä tavoin voidaan minimoida putkivalmistuksen kustannuksia ja oheisjärjestelmille asetettuja vaatimuksia. Putkien tyhjentäminen tankkiin vaatii myös reititykseltä tarkkuutta, sillä putkiston tekemiä pusseja ei saa syntyä. Koska laivassa on paljon muita järjestelmiä, ja sitä myöten putkituksia, on reitityksessä annettava ensisijaisuutta metanoliputkistolle ja tehdä tarvittavat tilavaraukset hyvissä ajoin suunnittelun alkuvaiheessa.

4.4 Inerttijärjestelmä

Inerttijärjestelmä on yksi oleellinen oheisjärjestelmä metanolia käyttävillä laivoilla. Järjestelmän tehtävänä on pienentää polttoaineen palamisen tai räjähtämisen riskiä vähentämällä polttoainetta sisältävien komponenttien happipitoisuutta. Esimerkiksi tankeissa on pidettävä

typpi-ilmakehä aina, kun niissä säilytetään metanolia. Myös tankkien tyhjennysvaiheessa metanolihöyryt on kyettävä puhaltamaan pois typen avulla, ennen kuin happea voidaan tuoda järjestelmään. Tankkien ja polttoaineputkistojen lisäksi inerttikaasua voidaan tarvita kuivasäiliöihin tai tuplaputkien inertoituihin ulkoputkiin. Typpijärjestelmän ja polttoainejärjestelmän väliin on tehtävä niin sanottu ”double block and bleed” venttiilijärjestely, jossa on kaksi sulkuventtiiliä prosessissa ja kolmas venttiili, jonka kautta mahdollinen vuoto poistuu. Mikäli laivaan ei muuten typpijärjestelmää konseptivaiheessa ole tulossa, on typen tuottamiseen ja/tai varastoimiseen kiinnitettävä erityistä huomiota. Metanolipolttoainejärjestelmä vaatii joko itsenäisen typpigeneraattorin tai vaihtoehtoisesti säiliöt, joissa on kapasiteettia laivan oletetun pisimmän matkan tarpeisiin sekä kahden viikon satamakuormalle. Edellä mainittuja asioita on visualisoitu kuvassa 18.

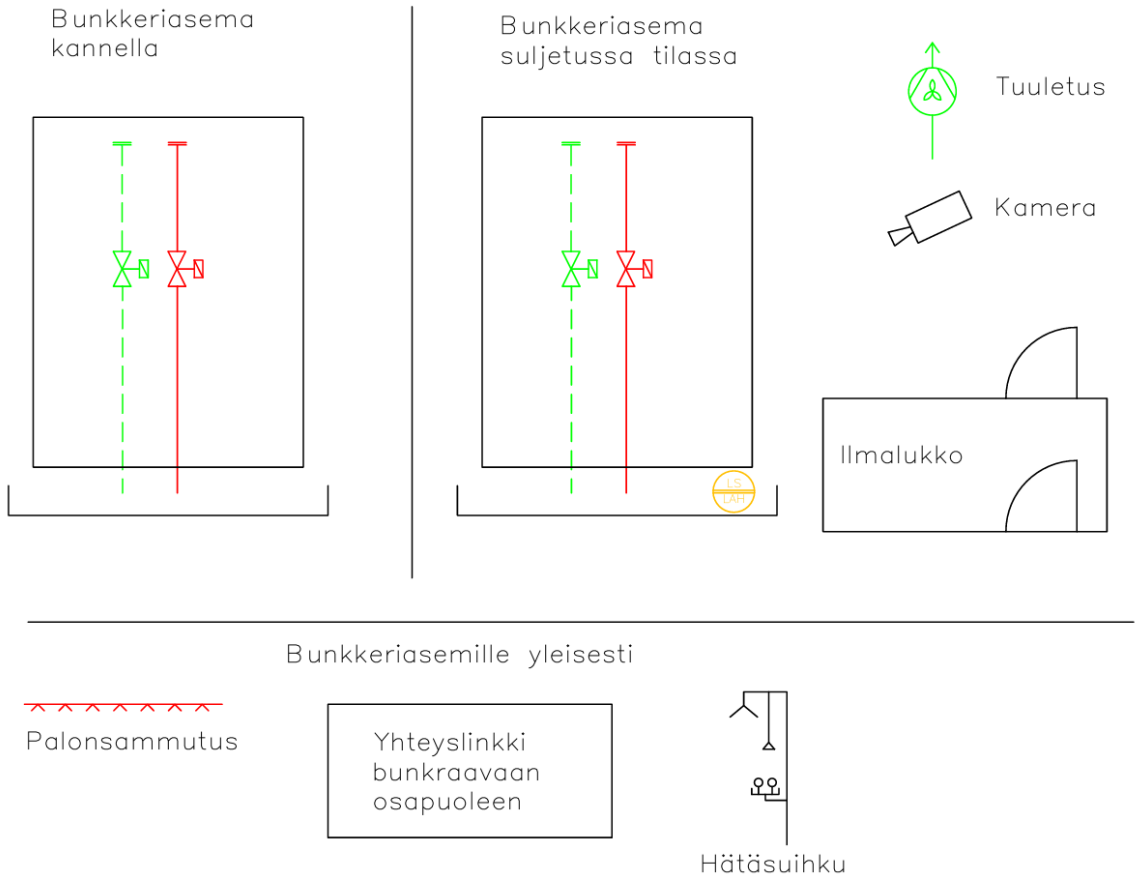


Kuva 18 Inerttijärjestelmän ominaisuuksia

Siltä osin kuin inerttijärjestelmää ei suunnittelun alaiseen laivaan ollut muuten tulossa, lisää se luonnollisesti polttoainejärjestelmän kokonaiskustannuksia. Myös tarvittavat tilavaraukset on huomioitava sekä putkireititys, sillä inerttiputkistoa ei saa vetää suljettujen tilojen läpi. Tämä on ihan ymmärrettävää, sillä vuotaessaan tuulettamattomaan tilaan typpi voisi pienentää ilman happipitoisuutta ja tehdä paikasta hyvin vaarallisen.

4.5 Bunkkeriasema

Bunkkeriaseman voi rakentaa karkeasti rakenteellisesti kahdella eri tavalla, joko avoimelle ulkokannelle tai suljettuun tilaan. Kannella olevalle bunkkeriasemalle tarvitaan muun muassa vuotokaukalo, palonsammutus, yhteyslinkki bunkraavalle taholle sekä hätäsuihkut. Mikäli bunkkeriasema rakennetaan suljettuun tilaan, on tilanne hieman mutkikkaampi. Tilaan on luonnollisesti järjestettävä tuuletus, mutta myös keinot vuodon havaitsemiseksi. Lisäksi DNV listaa yksityiskohtana myös kamerayhteyden, IMO:n tyytyessä rajaamaan bunkrauksen valvonnan turvalliseen paikkaan. Vastaavasti myös vaatimus ilmalukosta on IMO:n säännöissä kerrottu rivien välissä ja selkeästi tarkennettu DNV:n säännöissä. DNV kertoo ilmalukon olevan selkeästi suljetun bunkkeriaseman vaatimusten listalla, kun taas IMO puolestaan vaatii, että ilmalukko yleisesti tarvitaan turvallisen ja kaasuvaarallisen tilan väliin. Bunkkeriasemalle muodostuu kaasuvaarallinen tila, näihin palataan kappaleessa 4.8. Edellä mainittuja bunkkeriasemalle asetettuja vaatimuksia on nähtävillä kuvassa 19.

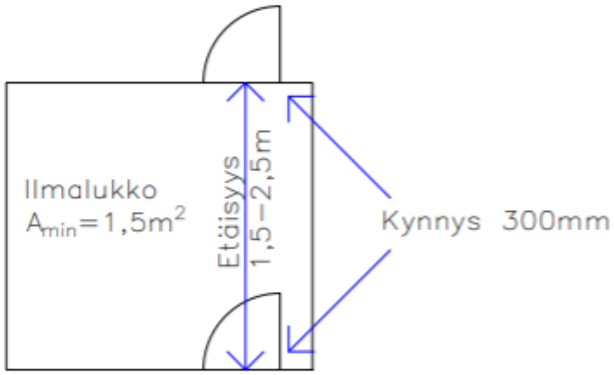


Kuva 19 Bunkkeriasemalle asetettuja vaatimuksia

Bunkkeriaseman rakentaminen kannelle on selkeästi yksinkertaisempaa ja siten myös halvempaa. Tällöin ei tarvitse investoida esimerkiksi ilmanvaihtoon ja ilmalukkoon, joka myös tarvitsee oman ilmanvaihtonsa. Myös bunkkeriaseman sijainti laivassa on syytä tarkastella, sillä se vaatii A-60 laipioita muun muassa asuin- tai konetiloja kohden. Voi olla, että rahtilaivoissa ulkokannen bunkkeriasema on käytännössä selviö, mutta matkustaja-aluksissa halutaan mieluummin preferoida laivan ulkonäköä ja jättää mahdollisimman laajat ulkokansialueet asiakkaiden käyttöön. Joka tapauksessa bunkkeriaseman sijoittamista pohdittaessa on selvitettävä myös mahdolliset bunkraussatamat sekä -prosessit, jotta saadaan riittävällä tarkkuudella huomioitua kyseisen laivan kannalta oleelliset asiat jo konseptivaiheessa.

4.6 Ilmalukko

Ilmalukon osalta sääntöjä vertaillessa IMO:n ja DNV:n säännöstön välillä on huomattavaa eroa. DNV:n säännöt ovat erittäin suppeita ja ne tyytyvät lähinnä toteamaan, että ilmalukko tarvitaan, kun polttoaineen käsittelytilaan ei kuljeta ulkokannelta ja bunkkeriasema on suljetussa tilassa. IMO puolestaan vaatii, että mikäli operoinnin vuoksi on kuljettava kaasuvaarallisiin tiloihin turvalliselta alueelta, on kaikissa tapauksissa väliin rakennettava ilmalukko. Tämän lisäksi IMO:n säännöstössä on asetettu kuvan 20 mukaiset vaatimukset ilmalukon geometrialle; ovien etäisyys toisistaan on 1,5–2,5 m, oven kynnyksen oltava vähintään 300 mm ja ilmalukon pinta-alan vähintään 1,5 m^2. Ilmalukon suunnitteluperiaatteeseen kuuluu lisäksi ylipaineistettu ilmanvaihto suhteessa kaasuvaaralliseen tilaan.



Kuva 20 Ilmalukon mittatietoja

Ilmalukot tuuletuskanavineen vaativat oman tilansa laivassa, joten näiden määrä olisi syytä minimoida. Tehokkain tapa tähän on järjestää kulku kaasuvaarallisiin tiloihin ulkokautta, sekä rakentaa metanolin bunkkeriasema ulkokannelle. Ilmalukkoja ei myöskään vaadita oletuksena useampia yhtä polttoainetilaa kohden, joten siltä osin toissijaista poistumistietä ei näistä tiloista tarvitse järjestää.

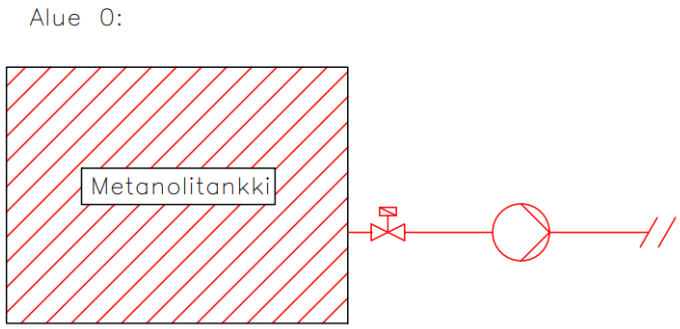
4.7 Ilmanvaihto

Ilmanvaihdon järjestäminen metanolijärjestelmiin liittyviin tiloihin on yksi tärkeä kokonaisuus, johon on kiinnitettävä erityistä huomiota. Kaasuvaarallisten tilojen ilmanvaihtoa ei saa yhdistää turvallisen alueen ilmanvaihtoon, tuloilma on otettava turvalliselta alueelta ja poistoilma on vietävä näistä erilleen. Huomionarvoista on myös ilmanvaihdon tekemä kaasuvaarallinen alue ilmanvaihtokanaviin ja niiden päihin. Näiden mainittujen tilojen tuuletus on järjestettävä asentamalla puhallin poistopuolen kanavaan. Nämä säännöt ovat hyvin yhteneväisiä IMO:n ja DNV:n kesken, mutta aiemmin mainittu säännöstö vaatii myös turvallisen alueen poistojen olevan poissa kaasuvaarallisilta alueilta.

Ilmanvaihtomäärät ovat hyvin korkeita, sillä esimerkiksi kaksoisputken välitilan, polttoaineen käsittelytilan ja mahdollisen erillisen tankkitilan ilmanvaihdon pitää olla vähintään 30 ilmanvaihtoa tunnissa. Tästä DNV:n säännöstö on kiristänyt polttoaineen käsittelytilan ilmanvaihdon kapasiteetin vaatimuksen 45 ilmanvaihtoon tunnissa. Tankkien turvalliseksi tekemisessä vaadittava tuuletus on myös syytä pohtia erikseen. Tätä DNV:n säännöstö on IMO:n säännöstöön nähden kiristänyt kieltämällä tankkituuletuksen liittämisen polttoaineen käsittelytilan tuuletukseen.

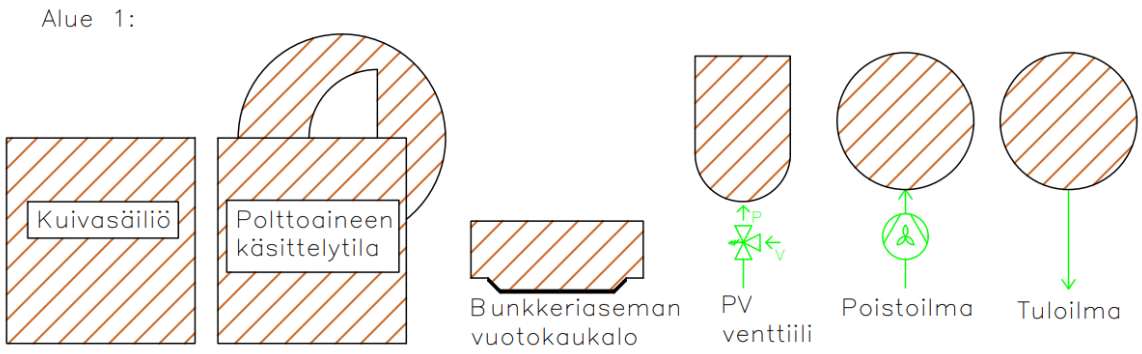
4.8 Kaasuvaaralliset tilat

Perinteisistä öljypolttoaineista metanolijärjestelmän erottaa määritykset kaasuvaarallisista alueista. Aluemäärityksissä käytetään IEC:n asettamia periaatteita. Alueet on jaoteltu kolmeen eri alueeseen (eng. zone). Alue 0 koostuu tiloista, joissa metanolia on läsnä jatkuvasti. Tällaisia ovat tankkien, metanoliputkistojen ja niiden sisältämien laitteiden sisätilat. Kuvassa 21 on esitetty alueen 0 kaasuvaaralliset alueet.



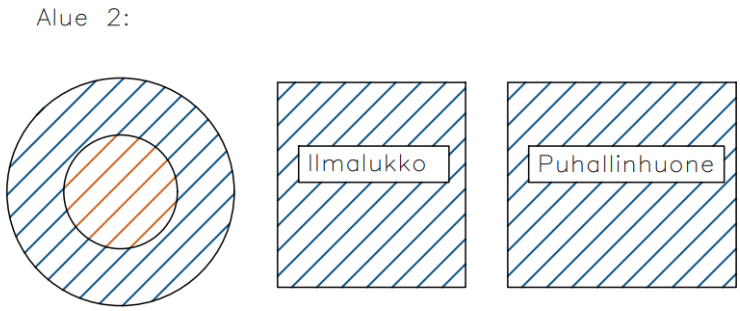
Kuva 21 Kaasuvaarallisia tiloja, alue 0

Alueen 1 muodostavat alueet, jotka käytännössä ovat alueen 0 viereisiä tiloja. Tällaisia ovat esimerkiksi tankkeja ympäröivät kuivasäiliöt ja polttoaineen käsittelytilat, sekä näiden tilojen ilmanvaihto sisältäen kaasuvaaralliset alueet myös ilmanoton ja -poiston ympäristössä. Mikäli käsittelytilaan käynti on ulkokannelta, muodostuu tämän kulkuaukon ympärille alueen 1 kaasuvaarallinen tila. Myös bunkkeriaseman vuotokaukalo muodostaa oman alueensa, sekä PV venttiilin ympäristö. Kuvassa 22 on havainnollistettu alueen 1 kaasuvaarallisia tiloja.



Kuva 22 Kaasuvaarallisia tiloja, alue 1

Kolmas, ja viimeinen alue, on alue 2. Ne muodostuvat alueen 1 ympärille. Lisäksi näihin luetaan myös ilmalukot ja kaasuvaarallisten tilojen puhallinhuoneet. Nämä on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23 Kaasuvaarallisia tiloja, alue 2

IMO:n ja DNV:n määritelmät kaasuvaarallisille alueille ovat hyvin yhteneväiset, kuten olettaa saattaa. IMO asettaa myös joitakin lisävaatimuksia ilmalukon suojaamalle alueelle, joita DNV:n säännöstöstä ei löydy. Toinen ero löytyy PV venttiilin suoja-alueesta; IMO:n säännöstössä vaatimus varoalueeksi esimerkiksi asuin- ja huoltotiloja, sekä näiden ilmanvaihtoa kohden on asetettu 10 m:n mittaiseksi. DNV on kiristänyt tätä IMO:n vaatimusta ja päätynyt 15 metrin varoalueeseen.

Kaasuvaarallisilla alueilla voi olla merkittävä vaikutus laivan konseptisuunnittelussa, riippuen paljolti laivan tyypistä. Mikäli kyseessä on matkustajalaiva, voivat kaasuvaaralliset alueet aiheuttaa merkittävää reititystarvetta esimerkiksi ilmanvaihdon osalta ja huomiointia PV venttiilien sijoittamista pohdittaessa. Toisaalta rahtilaivassa kaasuvaarallisten alueiden sijoittaminen ei ole niin haasteellista, koska alueet ovat miehistön käytössä ja avointa kansitilaa voi olettaa olevan enemmän käytettävissä. Kaikkein vaivattomimmaksi tällä logiikalla muodostuvat kemikaalitankkerit, sillä näissä on muutenkin kaasuvaarallisia alueita. Rahtilaivoissa ja kemikaalitankkereissa on järjestelyn kannalta helpompaa asettaa esimerkiksi polttoainetankkeja suoraan kannelle, jolloin kaasuvaarallisia sisätiloja ei muodostu niin laajalti kuin matkustajalaivoissa, joissa tankit haluttaneen sijoittaa rungon sisään.

4.9 Metanolipilssi

Metanolipolttoainetiloissa on oltava oma pilssijärjestelmä, joka on erillinen laivan muista pilssijärjestelmistä. Metanolipilssijärjestelmää on kyettävä käyttämään metanolitilojen ulkopuolelta ja metanolipilssille on osoitettava oma tankki, joka pitää pystyä tyhjentämään

maihin vuotonesteiden jatkokäsittelyä varten. Vuotojen tunnistus kuuluu olennaisena osana pilssijärjestelmään. Tunnistimia pitää olla kaikissa metanolipolttoaineeseen liittyvissä tiloissa, sekä kaksoisseinämäisissä putkissa.

Metanolipilssitankille on IMO:n säännöissä asetettu selkeä vaatimus tankin inertoinnille, DNV puolestaan kertoo inertoinnin koskevan yleisesti kaikkia tankkeja, joissa on matalan leimahduspisteen polttoainetta. IMO:n säännöstö mahdollistaa pienten, alle 10 litran vuotojen tyhjentämisen manuaalisesti; tähän DNV ei ota lainkaan kantaa.

Metanolipilssille asetetut vaatimukset ovat hyvin ohuet verrattuna laivojen muihin pilssijärjestelmiin, kuten pääpilssiin tai öljyiseen pilssiin. Järjestelmältä ei vaadita minkäänlaista tiettyä kapasiteettia tai redundanttisuutta, joita esimerkiksi pääpilssijärjestelmälle on asetettu. Myöskään kykyä pumpata nesteitä laivasta pois suoraan mereen ei vaadita. Siten voinee sanoa sääntöjen lähtevän tulkinnasta, ettei metanolipolttoainejärjestelmien tiloissa tapahdu vesivuotoja tai palonsammutusvettä ei tarvitse pystyä tiloista poistamaan. Nämä ovat räikeässä ristiriidassa laivan pääpilssijärjestelmän suunnitteluperiaatteiden kanssa. Niiltä osin kuin tilojen määrä on hyvin rajoitettuja ja pääosin ulkokansilla, ei ongelmaa todennäköisesti muodostu. Toisaalta tilanteessa, mikäli metanolitankkitiloja on vesirajan alapuolella ja tankkeja kaksoispohjassa sekä tiloja laajalla alueella, voivat riskit kasvaa merkittäviksi. Pääpilssikapasiteetin puuttuminen metanolipolttoainetiloista voi aiheuttaa sokeita pisteitä esimerkiksi vakavuuslaskijalle tai paloturvallisuudesta vastaavalle ja siten kokonaisuudesta voi nousta esiin riskejä.

Mikäli esimerkiksi polttoaineen käsittelytila on laitaa vasten ja tähän tulee vaurio, ei veden poistamiseen tilasta ole välttämättä mitään edellytyksiä. Täten pitänee olettaa sallituksi tilan täyttymisen vedellä. Käytännössä vesi alkaa valua kuitenkin kynnysten yli viereiseen tilaan, mikäli kulku käsittelytilaan ei ole yläpuolelta ulkokannelta vaan ilmalukon kautta samasta osastosta. Vasta viereiseen tilaan vuotaessaan pääpilssijärjestelmä on käytettävissä.

Ajatusta voi vastaavasti viedä eteenpäin myös palotilanteen kannalta. Mikäli palo pääsee leviämään veden mukana naapuriosastoon, se saattaa levittää paloa tehokkaasti. Metanoli palaa alhaisilla metanoli-vesi pitoisuuksilla. Myös massiivinen metanolivuoto yhdistettynä palamiseen voi aiheuttaa palon leviämistä vastaavalla tavalla turvalliselle alueelle, johon ei erityisiä metanolipalon sammutusjärjestelmiä ole välttämättä asennettu.

4.10 Kaasuvuotojen tunnistaminen

Vuotoja on sääntöjen mukaan tarkkailtava pintahälyttimien lisäksi myös kaasuntunnistusjärjestelmillä. Kaasuntunnistusjärjestelmiä on käytännössä sijoitettava kaikkiin metanolipolttoainejärjestelmän kannalta oleellisiin suljettuihin tiloihin, joissa metanolia ei normaalisti pitäisi olla. Tällaisia ovat esimerkiksi kuivasäiliöt, polttoaineen käsittelytilat, ilmalukot ja tilat, joissa on metanolin kuluttajia. Mikäli kaksoisseinämäinen putki on tuuletetulla välitilalla, on tähän välitilaan asennettava kaasuntunnistin. Tämän lisäksi typpigeneraattoritilassa on mitattava happipitoisuutta. Tilassa, josta mennään kuivasäiliöön, on mitattava happea ja metanolihöyryjä. Listausta on visualisoitu kuvassa 24.

Myös tämän apujärjestelmän kannalta on yksinkertaisinta ja edullisinta järjestellä metanolin käyttöön liittyvät tilat mahdollisimman kompaktiksi kokonaisuudeksi. Huomionarvoista on myös se, ettei kaasunhaistelujärjestelmiä tarvita avoimilla ulkokansilla. Tilakohtaisia tunnistimien määriä pohdittaessa on otettava huomioon muun muassa tilan muoto ja ilmanvaihtojärjestelyt.

DNV:n ja IMO:n säännöt ovat näiden osalta hyvin yhteneväisiä ja tässä työssä käytettyyn 2023 versioon DNV on lisännyt vaatimuksia, jotka olivat aiemmin mainittu ainoastaan IMO:n säännöstössä muttei DNV:llä. Lisäksi DNV on nyt myös tunnistanut metanolin myrkyllisyyden ja ottanut kantaa siten myös ppm-tason mittauksiin pelkkien LEL-rajoihin perustuvien hälytyksien sijaan. DNV:n säännöstössä on myös lisävaatimuksena mainittu polttoaineen jäähdytykseen tai lämmitykseen käytettävän paisuntasäiliön kaasuntunnistus sekä kannettavien kaasuntunnistimien käyttö tankkitiloihin mennessä. IMO:n säännöstö tyytyy mainitsemaan, että kannettavien kaasuntunnistimien käyttö on ohjeistettava järjestelmän manuaalissa.

Kuva 24 Kaasuvuotojen tunnistuspaikkoja

4.11 Paloturvallisuus / palonsammutus

Paloturvallisuuden osalta säännöstöt ovat antaneet yksityiskohtaisia sääntöjä, mutta myös tärkeitä konseptitason rajoituksia. Eräs tiedostettava asia on esimerkiksi vaatimus A-60 laipioista polttoaineen käsittelytilan tai bunkkeriaseman ja muiden, esimerkiksi konetilojen, majoitustilojen ja rahtitilojen väliin. Myös kuivasäiliön ja A-luokan konetilan väliin vaaditaan A-60 laipio. Tämän etäisyys on IMO:ssa määritetty olemaan 600 mm, mutta DNV ei vastaavaa mainitse. Kannella olevalla polttoainetankille on asetettu myös vaatimuksia A-60 laipioista. DNV on lisäksi tarkentanut, että poistumisreitit pitää suojata mahdollisilta polttoainejärjestelmän aiheuttamilta paloriskeiltä.

Palosammutusjärjestelmien pitää olla metanolille soveltuvia ja niiden on täytettävä Solaksessa ja FSS koodissa (International Code for Fire Safety Systems) annetut yleiset vaatimukset polttoaineen käsittelytiloissa ja konehuoneessa. DNV on tätä kohtaa vielä kiristänyt vaatimuksella lippuviranomaishyväksynnästä, sekä maininnut kaasusammutuksen käyvän sekä veteen perustuvan myös, jos voidaan sen todentaa sammuttavan kaikki relevantit metanolipalot. Metanolipaloille soveltuva vaahtosammutusjärjestelmä on oltavissa polttoaineen käsittelytilassa sekä A-luokan konetiloissa kannella ja turkkitasolevyjen alla pilssissä.

Vastaava järjestelmä vaaditaan myös kansitankkien ympärille ja sen on ulotuttava myös tankin alle. IMO:ssa vaahtosammutusjärjestelmä vaaditaan myös bunkkeriasemalle, mutta DNV:n säännöstöstä sen voi tulkita olevan vaadittu ainoastaan ulkokannella olevalle bunkkeriasemalle. Tämän voi olettaa olevan todennäköisesti muotoiluvirhe. Kannella olevien tankkien ympärille on järjestettävä myös kiinteä vesisuihkujärjestelmä polttoainetankkien jäähdytystä, palonsammutusta ja suurten vuotojen laimentamiseksi. Palontunnistimien pitää olla myös tyyppiä, joka soveltuu metanolipalojen tunnistamiseen savuun perustuvien tunnistimien lisäksi. DNV:n säännöstö on lisäksi asettanut joitakin tarkennuksia ja lisävaatimuksia kemikaalitankkereiden palonsammutusjärjestelmille.

Palonsammutusjärjestelmien osalta säännöstöjen välillä ei ollut suuria poikkeamia ja isot linjat olivat hyvin yhteneväiset. Tämä johtunee palonsammutuksen luonteesta olla kriittinen turvallisuusjärjestelmä laivassa. DNV kuitenkin listaa enemmän yksityiskohtaisia ohjeita tälläkin osa-alueella. Konseptisuunnittelua tehdessä huomionarvoista on kuitenkin tarkastella edellä mainittuja lisävaatimuksia, esimerkiksi alkoholille soveltuvan vaahtosammutusjärjestelmän osalta, jota ei kaikkiin laivoihin ole automaattisesti tulossa. Vaatimus A-60 luokan laipioista voi aiheuttaa pahimmillaan rakenteellisia muutoksia. Myös muilla pienemmillä yksityiskohdilla on jonkinlainen, mutta todennäköisesti suhteellisen pieni, hintavaikutus.

4.12 Turvallisuusjärjestelmä

Metanolipolttoainejärjestelmään sisältyvä turvallisuusjärjestelmä on käytännössä edellisissä kappaleissa mainittujen järjestelmien taustalla ja sitoo nämä erilliset kokonaisuudet yhteen. Järjestelmä tekee turvallisuusperusteisia hälytyksiä ja toimenpiteitä poikkeaman mukaan. Oleellisia toimenpiteitä tehdään muun muassa metanolivuotojen havaitsemisen, tankkien ylitäytön estämisen tai bunkraukseen liittyvän linkkiyhteyden perusteella. Tähän, ja metanolijärjestelmään liittyvään ohjausjärjestelmään, on säännöissä useita yksityiskohtaisia ohjeita, joita DNV on listannut IMO:n säännöstöä tarkemmin ja kattavammin. Myös järjestelmän operointi- ja huoltomanuaalin voi laskea osaksi turvallisuuskokonaisuutta. Konseptitason suunnittelua tehdessä on syytä varata merkittävästi aikaa ja resursseja, jotta kaikkien edellä mainittujen kappaleiden sisältämät turvallisuuteen liittyvät asiat tulevat sääntöjenmukaisesti ja turvallisesti otettua huomioon.

4.13 Polttoainejärjestelmän vaatimusten yhteenveto ja vertailu

Metanolin käyttämiselle polttoaineena on asetettu erityisvaatimuksia ja siten muodostuu myös eroja perinteisiin öljypolttoaineisiin nähden. Käytännössä kaikki tässä pääluvussa listatut asiat poikkeavat perinteisistä öljypolttoaineista. Oikeastaan vain sääntöjen tavoitteet ja filosofia ovat samanlaiset, öljypolttoaineiden tarjotessa vertailukohdan ja uuden sukupolven polttoaineiden tavoitellessa vastaavaa tasoa.

Taulukkoon 13 on kerätty yhteenvedonomaisesti taulukkoon metanolin ja öljypolttoaineiden oleellisimmat erot edellisissä alaluvuissa käsitellyistä asioista. Metanolin vaarallisuus sääntömielessä perustuu pitkälti sen alhaiseen leimahduspisteeseen. Myös muut ominaisuudet, kuten myrkyllisyys, otetaan huomioon. Alhainen leimahduspiste aiheuttaa polttoaineen ympärille kaasuvaarallisia alueita, jotka puolestaan vaativat erityistä huomiota polttoainejärjestelmän ja sen apujärjestelmien eri osissa. Heijastuksia on nähtävissä esimerkiksi näiden tilojen kaasuntunnistuksessa ja ilmanvaihdossa, sekä tilojen järjestelyssä bunkkeriasema mukaan lukien. Tilojen järjestely laivassa voi vaatia ilmalukkoja turvallisen kulun järjestämiseksi kaasuvaarallisiin tiloihin. Vastaavia tiloihin liittyviä erityisvaatimuksia ei perinteisillä öljypolttoaineilla ole olemassa ja ilmanvaihdon määrät ovat huomattavasti maltillisempia.

Polttoaineen säilytys on molemmissa ryhmissä mahdollista runkotankeissa, mutta metanolilla, öljypolttoaineista poiketen, tankit on mahdollista järjestää ulkolaidoitusta vasten kaksoispohjassa. Matalan leimahduspisteen polttoaineen säilyttämisessä on tärkeää minimoida räjähtävän seoksen syntyminen, joten myös inerttikaasu on vaadittu tankkien kaasutilan kontrolloimiseksi.

Metanolin käsittelytilat vaativat erikseen myös oman pilssijärjestelmän, jota ei saa yhdistää muihin laivan pilssijärjestelmiin. Paloturvallisuudessa on huomioitava polttoaineen erityisominaisuuksia, esimerkiksi alkoholiresistanssin vaahtosammutusjärjestelmän avulla. Vastaavaa ei öljypolttoaineille vaadita. Kaiken esitetyn lopulta sitoo yhdeksi kokonaisuudeksi turvallisuusjärjestelmälle asetetut vaatimukset sekä siihen sisältyvä operointi- ja huoltomanuaali. Tämän osuus kaikkine yksityiskohtineen on merkittävässä osassa metanolipolttoainejärjestelmää ja sen turvallista käyttöä.

Taulukko 13 Osa-alueiden yhteenveto ja vertailu

Osa-alue	**Metanoli**	**Öljypolttoaineet**
Sääntöjen tavoitteet ja filosofia	Pyrkimys perinteisten öljypolttoaineiden tasoon	Vertailukohta
Tankit ja järjestely	Runkotankit, kaksoispohjatankit laitaa vasten	Runkotankit, ei kaksoispohjatankkeja laitaa vasten
Polttoaineputkiston vaatimukset	Vaatimuksia kaksoisseinämäisistä putkista	Yksiseinämäisiä
Inerttijärjestelmä	Tarpeellinen	Ei tarpeellinen
Bunkkeriasema	Polttoaineen aiheuttamia erityisvaatimuksia	Perinteinen järjestely
Ilmalukko	Vaadittu suljetuissa tiloissa kaasuvaarallisiin tiloihin mentäessä	Ei tarpeellinen
Ilmanvaihto	Erityisvaatimuksia, parannettu ilmanvaihto	Pienempi ilmanvaihto
Kaasuvaaralliset tilat	Vaadittu	Ei tarpeellinen
Pilssijärjestelmä	Tiloissa erillispilssijärjestelmä, ei sallittua yhdistää pääpilssiin tai öljyiseen pilssiin	Laivan pääpilssi ja öljyinen pilssi polttoainetiloissa
Kaasuvuotojen tunnistaminen	Vaadittu	Ei tarpeellinen
Paloturvallisuus/palonsammutus	Polttoaineen aiheuttamia erityisvaatimuksia	Pitkät perinteet
Turvallisuusjärjestelmä	Polttoaineen aiheuttamia erityisvaatimuksia	Ei vastaavalla tasolla

Vaikka tässä työssä ei varsinaisesti käsitellä LNG:tä, on se kuitenkin mielenkiintoinen vertailukohta sen IGF-koodille asettaman pohjan ja nousseen tunnettavuuden vuoksi. Metanolille asetetut vaatimukset ovatkin isossa kuvassa hyvin pitkälle vastaavat kuin LNG:lle. Polttoaineiden alhainen leimahduspiste ajaa regulaation hyvin samanlaiseksi, mutta joitakin oleellisia eroja on hyvä tiedostaa.

LNG:n säilytys paineastioissa ja kryogeenisissä lämpötiloissa voivat tehdä LNG-polttoaine-järjestelmästä haasteellisemman ja kalliimman toteuttaa. Nämä ominaisuudet myös käytännössä estävät sen säilyttämisen kaksoispohjassa. Vuototilanteessa LNG:n voinee tunnistaa lämpötilan ja höyrystymisen aiheuttaman kaasun kautta helposti, mutta metanolilla ensisijainen keino lienevät pinnankorkeushälytykset. Myös huoneenlämpötilassa kaasuuntuminen aiheuttaa LNG:llä merkittävää kasvanutta tilavuusvaatimusta, jonka riskit on syytä tiedostaa. Metanoli puolestaan vaatii oman alkoholeille sopivan vaahtosammutuksen.

5 Johtopäätökset

Tämän työn tavoitteena oli selvittää minkälaisia vaatimuksia regulaatio asettaa metanolin käyttämiselle laivapolttoaineena konseptitasolla. Työssä saatiin hyvin selville IMO:n ja DNV:n metanolille asettamien säännöstöjen rajoituksia ja keskinäisiä eroja, sekä luotiin irrallisista sääntökohdista informatiivisia kuvia. Näiden avulla lukijalla on mahdollisuus saada karkean tason ymmärrys metanolipolttoainejärjestelmän vaatimuksista ja liittyvistä oheisjärjestelmistä laivassa. Opinnäytetyöprosessin aikana tarkasteluun valittiin DNV:n uusimmat, kesän 2023 säännöt, joissa oli päivitetty joitakin tekijän ennestään tunnistamia ristiriitoja tai muuten huomionarvoisia kohtia IMO:n ja DNV:n säännöstöissä. Tästä huolimatta työ pääsi tavoitteeseensa, myös uusimman tiedon preferointi oli työn luonteen kannalta oleellista, sillä ala on erittäin nopean muutoksen keskiössä.

Metanolipolttoainejärjestelmä poikkeaa huomattavasti perinteisiä öljypolttoaineita, esimerkiksi raskasta polttoöljyä tai dieseliä, käyttävistä laivoista. Merkittävimmät erot tulevat tiloille asetetuista rajoitteista, sillä metanolipolttoainetta pitää käsitellä niille asetetuissa tiloissa. Nämä tilat luetaan kaasuvaarallisiksi, sillä metanoli vaatii ympärilleen suljetuissa tiloissa aina toissijaisen suojakerroksen, esimerkiksi kaksoisseinämäisen putken tai rungon sisäisten metanolitankkien ympärille kuivasäiliön.

Metanoliin liittyvien tilojen on syytä olla mahdollisuuksien mukaan ulkokansilla, jotta voidaan minimoida kaasuvaarallisten tilojen aiheuttamat lisäkustannukset oheisjärjestelmineen. Siltä osin kuin polttoainejärjestelmä rakennetaan täysin rungon sisäiseksi, sisältäen bunkkeriasema, tankkitilat, polttoaineen käsittelytilan ja polttoaineen kulutustilat, olisi nämä tilat syytä pitää mahdollisimman lähellä toisiaan ja kaasuvaaralliset alueet kooltaan pieninä. Tällöin on mahdollista optimoida esimerkiksi kuivasäiliöiden lukumäärää ja tilavuutta, ilmalukkojen määriä, kaasuvaarallisten putkistojen reitityksiä laivassa turvallisilla alueilla sekä helpottaa ja vähentää näihin tiloihin liittyvää tuuletusvaadetta. Myös polttoainetankkien kappalemäärän pitäminen mahdollisimman pienenä auttaa kustannustehokkaan laivan suunnittelussa; tällöin tankkikohtaiset oheisjärjestelmät pysyvät mahdollisimman yksinkertaisina ja kuivasäiliöiden osuus laivan tilavuudesta voidaan pitää mahdollisimman pienenä ja täten jättää suurempi tilavuus laivan hyötykuormalle. Kaksoispohjatankkeja on edellä esitetyiden syiden takia kannattavaa suosia niissä laivoissa, joissa se on regulaation puolesta sallittua.

Järjestelyn yksinkertaisuudella on selkeää etua myös polttoaineputkien kannalta. Niiltä osin kuin voidaan pitää kaksoisseinämäiset putket mahdollisimman vähissä, saadaan luonnollisesti säästettyä kustannuksissa. Pitämällä putkivedot lyhyinä, myös niiden reitittäminen on helpompaa. Reitityksestä haastavaa tekee se, että putkisto pitää pystyä lähtökohtaisesti valuttamaan painovoimaisesti soveltuvaan tankkiin. Tästä syystä on helpompaa reitittää putkistoja vertikaalisti kuin horisontaalisesti. Siten on järkevää sijoittaa rungonsisäiset metanolijärjestelmän tilat mahdollisimman lähelle kuluttajatiloja sekä, olettaen näiden olevan laivan konehuoneen tasalla, bunkkeriasema mahdollisimman lähelle näiden tilojen yläpuolelle. Putkistojen tyhjentäminen on myös yksinkertaista, mikäli tarvittaville tyhjennyksille varataan oma tankki kaksoispohjasta.

Putkistojen ja tankkien käyttöön sekä turvalliseksi tekemiseen tarvitaan laivassa oma inerttijärjestelmä. Mikäli tällaista laitosta ei muuten laivaan ole tulossa, lisää se suoraan metanolipolttoainejärjestelmän rakennuskustannuksia vaaditun laitteiston, järjestelyn ja apujärjestelmien osalta. Vaikka inerttijärjestelmän tehtävänä on lisätä polttoainejärjestelmän turvallisuutta, pitää sen rakentamisessa huomioida myös riskit. Esimerkiksi inerttiä ei saa päästä vuotamaan suljettuihin tiloihin, koska se aiheuttaa tukehtumisvaaran. Laivassa pitää olla joko oma inerttilaitos tai pisimmän reitin sekä kahden viikon satamakuorman kattama määrä. Mikäli laivaan otetaan oma inerttilaitos, lisää se joustavuutta laivan operoinnissa sekä voi mahdollistaa isompienkin huoltotoimenpiteiden valmistelun, kuten tankkien turvalliseksi tekemisen.

Kaikki metanolitilat vaativat huomiota myös ilmanvaihdon ja palontorjunnan saralla. Ilmanvaihtovaatimukset ovat huomattavan isoja käsittelytiloissa, joten niiden koko on syytä pitää mahdollisimman pienenä, jotta voidaan pienentää sitä kautta myös ilmanvaihdon vaatimaa energiaa. Myös muut kaasuvaaralliset tilat vaativat oman tuuletuksensa ja edelleen kaasuvaaralliset tilat vaativat kaasuntunnistusjärjestelmät. Tuuletus luo itsessään kaasuvaarallisia alueita, joten kanavien sijaintiin on syytä kiinnittää huomiota. Palontorjunnassa on vastaavasti lisävaatimuksia, kuten vaahtoon perustuvat sammutusjärjestelmät ja metanolipaloille soveltuvat palontunnistimet.

Tiloissa on oltava oma erillinen metanolipilssi, eivätkä normaalit pilssijärjestelmät, pääpilssi ja öljyinen pilssi, saa olla näissä tiloissa. Metanolipilssiä ei ole määritelty läheskään samassa mittakaavassa kuin pääpilssijärjestelmää. Vaatimuksia ei ole asetettu esimerkiksi redundanttisuudelle, pumppukapasiteetille tai pilssiveden suoraan laivasta ulos pumppaamiselle. Täten

metanolipilssiä ei tarvitse mitoittaa esimerkiksi palo- tai vuototilanteita huomioiden. Tämä lienee säännöstön turvallisuusajattelun vakavin puute. Säännöstössä on kuitenkin selkeitä turvallisuusjärjestelmän vaatimuksia, mutta pilssin osuus on ehkä jäänyt sokeaan pisteeseen.

Edeltä mainitun perusteella voidaan todeta metanolipolttoainejärjestelmällä olevan konseptitasolla paljon useita erilaisia vaatimuksia. Jotta voitaisiin minimoida polttoainejärjestelmän kustannukset, laivan energiatehokkuus ja puolestaan maksimoida hyötykuorma, olisi suunnittelufilosofiana pidettävä ”yksinkertainen on kaunista” -periaatetta. Kaikki vaatimukset kertaantuvat aina oheissysteemien kautta, mikäli esimerkiksi tankkitilakokonaisuuksia tehtäisiin useampia. Tilavarauksia on sitä myöten suotavaa tehdä aikaisessa vaiheessa laivan konseptisuunnittelua. Tilojen olisi hyvä olla myös mahdollisimman pieniä, jotta voidaan minimoida niihin kohdistuvat tuuletusvaateet. Mikäli kyseessä on retrofit tai muutos kesken laivasarjan rakentamisen, on järjestelyyn kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta voidaan minimoida huonot kompromissit sekä saavuttaa yksinkertainen ja kustannustehokas järjestelmä.

Erilaisissa laivoissa on todennäköisesti erilaisia edellytyksiä järjestelmän rakenteelle, rahtilaivassa vapauksia on todennäköisesti enemmän kuin matkustaja-aluksessa. Jälkimmäisessä todennäköisesti halutaan priorisoida laivan ulkonäköä ja ulkokansia asiakaskäyttöön. Kemikaalitankkereissa muutos lienee kaikkein yksinkertaisinta, sillä esimerkiksi inertti-, sammutus- ja kaasunhaistelujärjestelmät ovat jollakin laajuudella jo ennestään laivaan tulossa sekä ne ovat todennäköisesti hyvin pitkälle myös vaatimustenmukaisia.

Tämä tutkimus on asettanut pohjan suunnittelunäkökulmaiselle jatkotutkimukselle metanolipolttoainejärjestelmien parissa. Jatkotutkimuksia voisivat olla esimerkiksi erityyppisten laivojen konseptien tekeminen tai case-tutkimukset. Myös yksittäisiin osajärjestelmiin on mahdollista syventyä hyvin pitkälle. Myös aikaulottuvuudessa olevalle regulaation tutkimukselle työ asettaa pohjaa, koska säännöstöä on kirjoitettu vuosittain uudelleen ja myös IMO:n viralliset IGF-koodiin liitettävät säännöt valmistuvat tulevaisuudessa. Lisäksi vertailuun voi lisätä eri luokkia.

Energiamurros on nyt hyvin kiihkeässä tilanteessa myös merenkulussa, sillä aiemmin vaihtoehtoisena polttoaineena oli tarjolla ainoastaan LNG. Nyt haastajaksi tullut metanoli on kiilannut uudisrakennuksissa suosituimmaksi vaihtoehdoksi sekä tulevaisuudessa myös ammoniakki on tulossa todennäköisesti samalle pelikentälle. Koska metanolipolttoaine on nyt

markkinoilla muutoksen keskiössä, on tärkeää, että asiasta kiinnostuneilla on mahdollisuus saada laaja-alainen konseptitason käsitys laivan metanolipolttoainejärjestelmälle asetetuista vaatimuksista. Tähän tarpeeseen tämä työ on vastannut.

Lähteet

ABS, 2021. American Bureu of Shipping. Sustainability whitepaper: Methanol as marine fuel. [Raportti] [Viitattu 11.6.2023]. Saatavilla: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2021/02/Sustainability-Methanol-as-Marine-Fuel.pdf

Airgas, 2019. Safety Data Sheet, Ammonia. Version 1.09, revision päivämäärä 1.10.2019. [Dokumentti] [Viitattu 2.8.2023]. Saatavilla: https://www.airgas.com/msds/001003.pdf

Ashrafi, M., Lister, J., Gillen, D. 2022. Toward a harmonization of sustainability criteria for alternative marine fuels. Maritime Transport Research. Volume 3, 2022, 100052. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 1.9.2023]. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.martra.2022.100052

Avinash, K.A., Anirudh, G., Nikhil, S., Akhilendra, P.S. 2019. Methanol and the Alternate Fuel Economy. Springer Nature Singapore Pte Ltd. ISBN: 978-981-13-3287-6. [E-kirja]. [Viitattu 17.6.2023]. Saatavilla: https://doi.org/10.1007/978-981-13-3287-6

Andersson, K., Salazar, C.M. 2015. Methanol as a marine fuel report. Prepared for Methanol Institute. FCBI energy. [Raportti] [Viitattu 11.6.2023]. Saatavilla: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/FCBI-Methanol-Marine-Fuel-Report-Final-English.pdf

Bouman, E.A., Lindstad E., Rialland A.I., Strømman A.H. 2017. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D. Volume 52, Part A, 2017, s. 408-421. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 2.9.2023]. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022

Dierickx, J., Dejaegere, Q., Peeters, J., Sileghem, L., Verhelst, S. 2022. Performance and emissions of a high-speed marine dual-fuel engine operating with methanol-water blends as a fuel. Fuel. Volume 333, Part 1, 2023, 126349. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 31.8.2023]. Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126349

DNV, 2023a. Alternative Fuel Insight platform. Det Norske Veritas. [Online-tietokanta] [Viitattu 19.8.2023]. Saatavilla: https://www.dnv.com/services/alternative-fuels-insight-128171 Vaatii kirjautumisen.

DNV, 2023b. RULES FOR CLASSIFICATION. Ships. Part 6 Additional class notations, Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems, Section 6 Low flashpoint liquid fuelled engines – LFL fuelled and gasoline refuelling and storage installations – Gasoline INST. Versio: Heinäkuu 2023. Det Norske Veritas.

DNV, 2022. MARITIME FORECAST TO 2050. Energy Transition Outlook 2022. Det Norske Veritas. [Raportti]

EPA, 2023. About Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs). United States Environmental Protection Agency. Päivitetty 30.5.2023. [Verkkosivu] [Viitattu 5.8.2023]. Saatavilla: https://www.epa.gov/aegl/about-acute-exposure-guideline-levels-aegls

GlobeNewswire, 2022. Methanol Market Size to Worth Around USD 61.7 Billion by 2030: As per Precedence Research, the global methanol market size is projected to be worth around USD 61.7 billion by 2030 from valued at USD 37.04 billion in 2021 and registering growth at a CAGR of 5.83% from 2022 to 2030. NASDAQ OMX Corporate Solutions, Inc. Päivitetty 18.1.2023. [Verkkouutinen] [Viitattu 8.8.2023]. Saatavilla: https://www.proquest.com/docview/2689244780/citation/D596B1BB8CCB4B1FPQ/1?accountid=27292 (Vaatii kirjautumisen)

Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., Grahn, M. 2019. Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. Biomass and Bioenergy. Volume 126, 2019, s. 159–173. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 29.10.2023] Saatavilla: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008

IEA, 2022. Global Energy and Climate Model. Documentation. International Energy Agency. Revisio: Joulukuu 2022. [Raportti] [Viitattu 11.8.2023]. Saatavilla: https://iea.blob.core.windows.net/assets/2db1f4ab-85c0-4dd0-9a57-32e542556a49/GlobalEnergyandClimateModelDocumentation2022.pdf

IEA, 2023. Energy system, Transport, International Shipping. Päivitetty 11.7.2023. [Verkkosivu] [Viitattu 10.8.2023]. Saatavilla: https://www.iea.org/energy-system/transport/international-shipping

ILO, 2004. International labour organization. 2. What is toxicology. [Verkkosivu] [Viitattu 16.6.2023]. Saatavilla: https://www.ilo.org/legacy/english/protection/safework/cis/products/safetytm/toxic.htm

ILO, 2023. International labour organization. Chemical Exposure Limits. [Verkkosivu] [Viitattu 16.6.2023]. Saatavilla: https://www.ilo.org/safework/info/publications/WCMS_151534/lang--en/index.htm

IMO, 2023. Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted. International Maritime Organization. [Verkkosivu] [Viitattu 12.8.2023]. Saatavilla: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx

IMO, 2022. International convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Annex I of MARPOL 73/78 Regulations for the Prevention of Pollution by Oil. Lloyd's Register Rulefinder 2022, versio 9.37. [Tietokoneohjelma]

IMO, 2020. INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL. MSC. 1/Circ. 1621. Päivätty: 7.12.2020. International Maritime Organization. The Maritime Safety Committee.

IMO, 2019. Improving the energy efficiency of ships. International Maritime Organization. [Verkkosivu] [Viitattu 13.8.2023]. Saatavilla: https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx

IMO, 2015. REPORT OF THE MARITIME SAFETY COMMITTEE ON ITS NINETY-FIFTH SESSION. ANNEX 1. ADOPTION OF THE INTERNATIONAL CODE OF SAFETY FOR SHIPS USING GASES OR OTHER LOW-FLASHPOINT FUELS (IGF CODE). MSC 95/22/Add. 1. Päivätty: 19.6.2015. International Maritime Organization. The Maritime Safety Committee.

IRENA ja Methanol Institute (2021), Innovation Outlook: Renewable Methanol, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. ISBN: 978-92-9260-320-5. [Raportti] [Viitattu 28.6.2023]. Saatavilla: https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol

Korberg, A. D., Brynolf, S., Grahn, M., Skov, I.R. 2021. Techno-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships. Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 142. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 6.7.2023]. DOI: 10.1016/j.rser.2021.110861

Lindstad, E., Lagemann, B., Rialland, A,. Gamlem, G. M., Valland, A. 2021. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. Transportation research part D: Transport and Environment, volume 101. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 26.8.2023]. DOI: 10.1016/j.trd.2021.103075

Methanex, 2023. Safety Data Sheet, Methanol. Revisio 3.2, revision päivämäärä 15.5.2023. [Dokumentti] [Viitattu 16.6.2023]. Saatavilla: https://www.methanex.com/wp-content/uploads/UL-METHANOL-EU_v3.2_eSDS_05.15.2023_English.pdf

Methanex, 2022. Sustainability report. [Raportti] [Viitattu 6.8.2023]. Saatavilla: https://www.methanex.com/wp-content/uploads/2023/04/Methanex-2022-Sustainability-Report.pdf

Methanol institute, 2023. Marine methanol, future-proof shipping fuel. May 2023. [Raportti] [Viitattu 11.6.2023]. Saatavilla: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/05/Marine_Methanol_Report_Methanol_Institute_May_2023.pdf

Methanol institute, 2015a. Compatibility of Metals & Alloys in Neat Methanol Service. Technical bulletin. Methanol Safe Handling. [Dokumentti] [Viitattu 3.8.2023]. Saatavilla https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Compatibility-of-Metals-Alloys-in-Neat-Methanol-Service.pdf

Methanol institute, 2015b. Compatibility of Elastomers in Neat Methanol Service. Technical bulletin. Methanol Safe Handling. [Dokumentti] [Viitattu 3.8.2023]. Saatavilla https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Compatibility-of-Elastomers-in-Neat-Methanol-Service.pdf

MMSA, 2022. MMSA-World-Supply-and-Demand-Summary-for-Methano-Institute. Methanol Market Services Asia. [Online-tietokanta] [Viitattu 7.8.2023]. Saatavilla: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/05/MMSA-World-Supply-and-Demand-Summary-for-Methanol-Institute-2.xlsx

MMSA, 2023. MMSA-Monthly-Price-Forecast-for-Methanol-Institute-12. Methanol Market Services Asia. [Online-tietokanta] [Viitattu 8.8.2023]. Saatavilla: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2023/08/MMSA-Monthly-Price-Forecast-for-Methanol-Institute-12.xlsx

Pasman, H., 2015. Risk Analysis and Control for Industrial Processes - Gas, Oil and Chemicals: A System Perspective for Assessing and Avoiding Low-Probability, High-Consequence Events. Elsevier Science & Technology, Oxford. ISBN: 978-0-12-800057-1 [E-kirja] [Viitattu: 1.8.2023]. Saatavilla: https://ebookcentral.proquest.com/lib/lut/detail.action?docID=2069956

REACH, 2009. Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Corrigendum to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH). Annex 1: GENERAL PROVISIONS FOR ASSESSING SUBSTANCES AND PREPARING CHEMICAL SAFETY REPORTS. [Online-tietokanta] [Viitattu 17.6.2023]. Saatavilla: https://reachonline.eu/REACH/EN/REACH_EN/articleI.html

Royal global energy, 2023. Methanol. [Digitaalinen kuva] [Viitattu 11.6.2023]. Saatavilla: https://royalglobalenergy.com/service/methanol/

Seungman H., Byongug J., Hayoung, J., Chybyung P., Buyngchurl, K., 2023. A framework for determining the life cycle GHG emissions of fossil marine fuels in countries reliant on imported energy through maritime transportation: A case study of South Korea. Science of the Total Environment. Volume 897, 2023, 165366. Elsevier. [Artikkeli] [Viitattu 30.8.2023]. Saatavilla: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165366

Työterveyslaitos, 2022. OVA-Ohjeet. Metanoli. [Verkkosivu] [Viitattu 5.8.2023]. Saatavilla: https://ova.ttl.fi/metanoli

Wissner, N., Healy, S., Cames, M., Sutter, J., 2023. Methanol as a marine fuel. Advantages and limitations. Öko-Institut e.V. [Raportti] [Viitattu 24.6.2023]. Saatavilla: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Methanol-as-a-marine-fuel.pdf