



**TURUN
YLIOPISTO**
Kauppakorkeakoulu

Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö merikuljetusten päästöjen vähentämisessä

Toimitusketjujen johtaminen
kandidaatintutkielma

Laatija:
Jesse Hynynen

Ohjaaja:
KTT Sini Laari

28.4.2025
Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Kandidaatintutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Jesse Hynynen

Otsikko: Vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö merikuljetusten päästöjen vähentämisessä

Ohjaaja(t): KTT Sini Laari

Sivumäärä: 46

Päivämäärä: 28.4.2025

Maailmankaupan globalisoituessa etenkin merikuljetukset ovat kasvattaneet suosiotaan etenkin niiden edullisen hinnan ja mittakaavaedun takia. Lisääntyneiden kuljetusmäärien ja kasvaneiden reittipituuksien takia merikuljetusten päästöihin tulee kiinnittää entistä enemmän huomiota. Merikuljetuksista aiheutuvia päästöjä on alettu reguloimaan entistä tarkemmin. Euroopan unioni ja Kansainvälinen merenkulkujärjestö ovat asettaneet tarkkoja päästövaatimuksia merikuljetuksille. Kunnianhimoisten päästötavoitteiden tarkoituksena on tehdä merikuljetuksista nettopäästöttömiä vuoteen 2050 mennessä.

Merikuljetuksista aiheutuvia päästöjä voidaan vähentää siirtymällä käyttämään vähäpäästöisiä vaihtoehtoisia polttoaineita. Tässä kandidaatintutkielmassa käsitellään merikuljetuksista aiheutuvia päästöjä, päästöjen sääntelyä ja nykyisin käytössä olevien perinteisten polttoaineiden ominaisuuksia. Tutkielmassa syvennyttään myös vaihtoehtoisten polttoaineiden ominaisuuksiin ja niitä vertaillaan perinteisiin polttoaineisiin päästöjen, kustannusten ja käyttöönoton näkökulmasta. Tieteellisen kirjallisuuden pohjalta voidaan todeta ammoniakkin olevan potentiaalisesti paras hiiletön polttoaine pitkällä aikavälillä. Siirtymävaiheessa kohti vähäpäästöisiä merikuljetuksia nestetytetty maakaasu (LNG) on houkutteleva vaihtoehto. Biopolttoaineet ovat niin lyhyellä kuin pitkällä aikavälillä hyvä vaihtoehto merikuljetusten päästöjen vähentämiseen, jos niiden tuotantoa skaalataan kattamaan kuljetussektorin energiatarpeet.

Avainsanat: merikuljetukset, vaihtoehtoiset polttoaineet, päästöt

SISÄLLYS

1	Johdanto	8
1.1	Johdatus aiheeseen	8
1.2	Tutkielman tavoite	9
2	Merikuljetusten päästöjen sääntely	10
2.1	Merikuljetusten aiheuttamat päästöt	10
2.2	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) päästöjen sääntelijänä	10
2.3	Euroopan unioni päästöjen sääntelijänä	12
3	Merikuljetusten perinteiset polttoaineet	16
3.1	Yleisimmät polttoainevaihtoehdot	16
3.1.1	Jäännöspolttoöljyt	17
3.1.2	Tislattut polttoaineet ja väliasteen polttoöljyt	19
3.2	Perinteisten polttoaineiden päästöt	20
4	Vaihtoehtoiset polttoaineet	23
4.1	Ammoniakki	23
4.1.1	Päästöt	23
4.1.2	Polttoaineen kustannukset	24
4.1.3	Käyttövalmius	25
4.2	Metanoli	25
4.2.1	Päästöt	25
4.2.2	Polttoaineen kustannukset	26
4.2.3	Käyttövalmius	26
4.3	Vety	27
4.3.1	Päästöt	27
4.3.2	Polttoaineen kustannukset	27
4.3.3	Käyttövalmius	28
4.4	Nesteytetty maakaasu (LNG)	28
4.4.1	Päästöt	29
4.4.2	Polttoaineen kustannukset	29
4.4.3	Käyttövalmius	29
4.5	Biopolttoaineet	30
4.5.1	Päästöt	31
4.5.2	Polttoaineen kustannukset	31
4.5.3	Käyttövalmius	31
5	Vaihtoehtoisten polttoaineiden SWOT-analyysi	33
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	36
	Lähteet	38

KUVIOT

Kuva 1 Kartta päästöjen valvonta-alueista (Tadros ym., 2023)	11
Kuva 2 WTW-analyysissä arvioitavat prosessit (Øberg, 2013)	20

TAULUKOT

Taulukko 1 Lyhenteet ja termit	6
Taulukko 2 Perinteisten meripolttoaineiden luokittelu (Dos Santos ym., 2022)	17
Taulukko 3 Kasvihuonekaasujen GWP-kertoimet (International Council on Clean Transportation, 2021)	21
Taulukko 4 Perinteisten meripolttoaineiden koko elinkaaren hiilidioksidi- ja hiilidioksidiekvivalenttipäästöt (International Council on Clean Transportation, 2021)	22
Taulukko 5 Vaihtoehtoisten polttoaineiden SWOT-analyysi	33

Taulukko 1 Lyhenteet ja termit

Bunkraus	Laivan polttoainesäiliön täyttö
CO₂e	Hiilidioksidiekvivalentti
Drop in -polttoaine	Uusiutuva polttoaine, joka sopii sellaisenaan käytettäväksi polttomoottorillisiin aluksiin.
DWT	Dead Weight Tonnage; tarkoittaa aluksen suurinta painoa eli kantavuutta
ECA	Emissions Control Area; päästöjen valvonta-alue
ETA	Euroopan talousalue; EU:n jäsenvaltioiden ja Islannin, Liechtensteinin ja Norjan luoma sisämarkkina-alue
ETS	EU Emissions Trading System; EU:n päästökauppajärjestelmä, jonka tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä
GHG	Greenhouse gases; kasvihuonekaasut
GT	Gross tonnage; aluksen bruttovetoisuus
GWP-kerroin	Global Warming Potential-kertoimia käytetään, kun kasvihuonekaasupäästöjä muunnetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi
HFO	Heavy Fuel Oil; raskas polttoöljy
IEA	International Energy Agency; Kansainvälinen energijärjestö
IFO	Intermediate Fuel Oil; polttoaine, jossa sekoitus raskasta polttoöljyä ja kaasuöljyä
IMO	International Maritime Organization; Kansainvälinen merenkulkujärjestö
Kryogeeninen säilytys	Kaasun säilytys erittäin alhaisessa lämpötilassa (alle -150 °C)
kW	Kilowatti
LBG	Liquefied Biogas; nesteytetty biokaasu
LCA	Life Cycle Assessment; päästöjen elinkaariarviointi
Lignoselluloosa	Biomassa, joka koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Voidaan käyttää bioetanolin raaka-aineena.
LNG	Liquefied Natural Gas; nesteytetty maakaasu
LSHFO	Low Sulfur Heavy Fuel Oil; vähärikkinen raskas polttoöljy, jonka rikki- ja raskasmetallipitoisuus on alle 1 %
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; IMO:n yleissopimus alusten aiheuttamien päästöjen kontrolloimisesta
MDO	Marine Diesel Oil; meridiesel eli aluksille tarkoitettu diesel
MEPC	Marine Environment Protection Committee; IMO:n meriympäristön suojelukomitea
MGO	Marine Gas Oil; vähärikkinen ja tislepohjainen meripolttoaine
MRV	Monitoring, Reporting, Verification; EU:n asettama CO ₂ -päästöjen raportointivelvollisuus
Mtoe	Miljoonaa öljytonniekvivalenttia; eri käyttövoimien energiamäärä muutettuna vastaamaan öljyn energiamäärää

MWh	Megawattitunti
NECA	Nitrogen Emission Control Area; IMO:n määrittelemä alusten typpipäästöjen valvonta-alue
SECA	Sulphur Emission Control Area; IMO:n määrittelemä alusten rikkipäästöjen valvonta-alue
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit; standardoitua merikonttia vastaava kuljetusyksikkö, joka on 20 jalkaa pitkä
TTW	Tank-To-Wake; polttoaineen käytön aikaiset päästöt
ULSFO	Ultra Low Sulfur Fuel Oil; äärimmäisen vähärikkinen polttoöljy, jonka rikkipitoisuus on alle 0,1 %
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development; Yhdistyneiden kansakuntien kauppaa- ja kehityskonferenssi
USD	Yhdysvaltain dollari; 1 EUR on noin 1,09 USD (maaliskuun loppu 2025)
VLSFO	Very Low Sulfur Fuel Oil; todella vähärikkinen polttoöljy, jonka rikkipitoisuus on alle 0,5 %
WTT	Well-To-Tank; polttoaineen valmistuksen ja jakelun aikaiset päästöt
WTW	Well-To-Wake; polttoaineen koko elinkaaren aikaiset päästöt valmistuksesta käyttöön asti

1 Johdanto

1.1 Johdatus aiheeseen

Merikuljetukset näyttelevät merkittävää roolia nykymailman globaaleissa toimitusketjuissa. Merikuljetukset ovat tehokas tapa kuljettaa suuria määriä hyödykkeitä, kuten tavaroita, raaka-aineita ja polttoaineita. Volyymiltään maailmankaupasta yli 85 % eli noin 12,3 miljardia tonnia kuljetettiin merikuljetuksilla vuonna 2023 (UNCTAD, 2024). Merenkulun trendi kuljetusmuotona on kasvamaan päin myös tulevaisuudessa. Yhdistyneiden kansakuntien kauppaa- ja kehityskonferenssi (eng. UN Trade and Development, UNCTAD) ennustaa raportissaan (2024) merikuljetusten määrän kasvavan 2,4 % vuosittain 2025–2029 välillä. Myös merikuljetusten tonnakilometrit, joka lasketaan kertomalla kuljetettavan kuorman paino tonneina kuljetetulla kilometrimatkalla, ovat kasvaneet muuttuneiden kuljetusreittien takia. Kuljetusreittejä ovat muokanneet niin Ukrainan sota, Punaisenmeren epävarma tilanne ja Panaman kanavan vesipulasta aiheutuneet pullonkaulat. (UNCTAD, 2024)

Meriliikenteen teknologinen kehitys on tehnyt merikuljetuksista entistä suositumpia, sillä niiden tehokkuus on parantunut. Laivojen määrä sekä kuljetuskapasiteetti on kokenut merkittävää kasvua. Vuonna 1988 kapasiteetiltaan suurimpaan laivaan mahtui 4300 kahdenkymmenen jalan konttia (TEU), kun vuonna 2014 vetoisuudeltaan suurimpaan laivaan kontteja mahtui jo 18 000 kappaletta. (Tran & Haasis, 2015)

Merikuljetusten suosion kasvaessa ja kuljetusmatkojen pidentyessä on kiinnitettävä erityisesti huomiota kuljetuksista aiheutuviin kasvihuonekaasupäästöihin (eng. greenhouse gases, GHG). Merikuljetusten osuus globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä on noin 2,9 %, joka tarkoittaa noin 1,1 miljardia tonnia (IMO, 2020). Vaikka meriteitse kuljettaminen on suoriteyksikköä kohden vähäpäästöinen kuljetusmuoto (Solakivi & Ojala, 2021), tulee merikuljetuksista aiheutuvia päästöjä laskea, jotta ilmastonmuutosta saadaan hillittyä. Merikuljetusten dekarbonisaatiota eli hiilidioksidipäästöjen vähentämistä on laiminlyöty, sillä päästöjen määrä on suhteellisesti vähäinen verrattuna muihin kuljetusmuotoihin (Law ym., 2021). Nykyiset polttoainevaihtoehdot, kuten meridiesel (MDO), raskas polttoöljy (HFO) ja vähärikkinen laivapolttoaine (MGO) tuottavat valtavat määrät hiilidioksidipäästöjä jokaista poltettua polttoainekiloa kohti (Issa ym., 2022).

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO ja Euroopan komissio on asettanut kunnianhimoisia merikuljetuksia koskevia päästöleikkaustavoitteita. Päästötavoitteiden saavuttamiseen on useita keinoja, kuten laivojen energiatehokkuuden parantaminen, uudet teknologiset ratkaisut ja vaihtoehtoiset polttoaineet (Issa ym., 2022). Pitkällä aikavälillä merikuljetusten irtautuminen hiilestä on välttämätöntä ja se voidaan tehdä siirtymällä käyttämään hiilineutraaleita tai vähähiilisiä

vaihtoehtoisia polttoaineita (Law ym., 2021). DNV (2024) esittää raportissaan potentiaalisimmiksi merikuljetusten vähäpäästöisiksi polttoaineiksi ammoniakkaa, metanolia, vetyä, nesteytettyä maakaasua ja biopolttoaineita.

1.2 Tutkielman tavoite

Tämän tutkielman tarkoituksena on tutkia ja vertailla meriliikenteen nykyisiä polttoaineita, vaihtoehtoisia polttoaineita ja kuinka niitä voidaan hyödyntää merikuljetusten kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kandidaatintutkielmassa käsitellään ja arvioidaan merikuljetusten polttoaineiden nykytilaa, merikuljetuksia koskevia ympäristömääräyksiä- ja tavoitteita sekä varteenotettavia vaihtoehtoisia polttoaineratkaisuja. Tutkielma toteutetaan tieteellisen kirjallisuuden kirjallisuuskatsauksena.

Tutkielmassa vastataan kahteen tutkimuskysymykseen. Tutkielmassa käsitellään nykypolttoaineisiin vertailevasti vaihtoehtoisten polttoaineiden erityispiirteitä ja hyötyjä:

- Millaisia ympäristöhyötyjä vaihtoehtoisilla polttoaineilla voidaan saavuttaa merikuljetuksissa verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin?

Tutkielman tavoitteena on myös kartoittaa ympäristöllisesti kestäviä ja meriliikenteeseen sopivia vaihtoehtoisia polttoaineita vastaamaan tiukentuvia päästötavoitteita. Aihetta lähestytään kokoavalla tutkielmakysymyksellä:

- Mitä haasteita ja mahdollisuuksia eri vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön liittyy?

Vaihtoehtoisia polttoaineita arvioidaan kolmesta eri näkökulmasta tieteellisen kirjallisuuden pohjalta:

1. Päästöt
2. Polttoaineen kustannukset
3. Käyttövalmius

2 Merikuljetusten päästöjen sääntely

2.1 Merikuljetusten aiheuttamat päästöt

Merikuljetukset voidaan yhdistää useisiin ympäristöön vaikuttaviin tekijöihin, kuten vesistöihin ja ilmaan vapautuviin saasteisiin ja epäpuhtauksiin (Gössling ym., 2021). Ilmaan vapautuviin päästöihin lukeutuu hiilidioksidi (CO₂), typpioksidit (NO_x), rikkioksidit (SO_x), metaani (CH₄), pienhiukkaset (PM) ja hiilimonoksidi eli häkä (CO) (Gössling ym., 2021), joista erityisesti typpioksidi ja hiilidioksidi kiihdyttävät ilmaston lämpenemistä (Richter ym., 2004; Traut ym., 2018).

Kasvihuonekaasupäästöjen koostuessa useista eri yhdisteistä, muunnetaan päästöistä CO₂-ekvivalenteja, jotta niiden mittaus ja vertailu on yhdenmukaista. Päästöjen CO₂-ekvivalenteiksi muuntamisessa käytetään GWP (Global Warming Potential) -kertoimia, eli lämmityspotentiaalikerroimia, joissa hiilidioksidin GWP-kerroin on 1 ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen GWP-arvot on määritetty vertaamalla niiden yhden kilogramman päästön aiheuttamaa säteilypakotetta maan pinnalla (W/m²) vastaavaan hiilidioksidin säteilypakotteeseen. (Solakivi & Ojala, 2021) Lämmityspotentiaalikerroimien määrittämisessä otetaan myös huomioon kaasujen erilaiset lämpösäteilyn läpäisyominaisuudet ja niiden viipymäajat ilmakehässä (Ilmatieteen laitos, 2024). Säteilypakote toimii ilmastojärjestelmän mittarina ja kertoo ilmakehästä poistuvan ja saapuvan säteilyn tasapainon muutoksista (Solomon ym., 2007). Iaconon ym. (2008) mukaan ilmakehän kasvihuonekaasupäästöistä johtuva säteilypakotteen epätasapaino on ensisijainen ilmastonmuutosta kiihdyttävä tekijä. Merikuljetuksista syntyvät päästöt vaikuttavat myös ihmisten terveyteen. Continin ja Mericon (2021) artikkelin mukaan merikuljetusten päästöt voivat aiheuttaa vakavia negatiivisia terveysvaikutuksia ihmisille, kuten astmaa, sydän- ja verisuonisairauksia, keuhkosityöpää ja ennen aikaista kuolleisuutta.

Vaikka merikuljetuksista aiheutuvat päästöt ovat pääasiassa hiilidioksidipäästöjä, tuottavat nykyiset polttoaineet myös muita haitallisia päästöjä ilmakehään. Erityisesti ilmakehään vapautuvat rikkipäästöt on pyritty vähentämään lähes nolliin, joka ei ole ollut kuitenkaan täysin ongelmatonta ilmaston lämpenemisen kannalta. Merikuljetuksista ilmakehään vapautuvista päästöistä hiilidioksidipäästöt (CO₂) lämmittävät ilmastoa, kun taas rikkipäästöt (SO_x) viilentävät ilmastoa epäsuorasti vaikuttamalla pilvien muodostumiseen ja ilmakehän pienhiukkasiin (Kontovas, 2020).

2.2 Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) päästöjen sääntelijänä

Merenkulusta aiheutuvien päästöjen sääntelyn historia on pitkä. Merenkulun ympäristönsuojelua koskeva lainsäädäntö on saatettu voimaan jo vuonna 1973 Kansainvälisen merenkulkujärjestön

(International Maritime Organization) toimesta. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on yksi keskeisimpiä merenkulun sääntelyn kehityksestä vastaavista tahoista. IMO:n neuvosto koostuu vaaleilla valituista 40 jäsenmaasta, jotka ohjaavat järjestön toimintaa. Suomi on ollut IMO:n jäsenmaa vuodesta 1959 alkaen, ja toimii järjestön neuvostossa kaudella 2024–2025.

IMO:n MARPOL 73/78-yleissopimuksen tarkoituksena on luoda pohja kansainväliselle lainsäädännölle, jolla pyritään estämään meriympäristön saastuminen laivojen operationaalisista tai tahattomista syistä, kuten onnettomuuksista. Erityisesti vuonna 1997 hyväksytty MARPOL-yleissopimuksen viides liite säätelee merenkulusta ilmaan vapautuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Liite VI saatettiin voimaan vuonna 2005, jolloin samalla voimaan astui ensimmäistä kertaa maailmanlaajuiset rajoitukset alusten rikkipäästöille (SO_x). Myöhemmin vuonna 2008 rikin ja typen oksidien päästörajoja kiristettiin entisestään, niiden ollessa tällä hetkellä ECA (Emissions Control Area) -alueilla lähes nollassa.



Kuva 1 Kartta päästöjen valvonta-alueista (Tadros ym., 2023)

SECA (Sulphur Emissions Control Area) -alueilla, joihin myös Itämeri lukeutuu, rikkipäästöjen ylärajaksi on määrätty 0,1 %. Rikkipäästöjen valvonta-alueen ulkopuolella globaaliksi päästörajaksi on määrätty 0,5 %. NECA (Nitrogen Emissions Control Area) -alueilla alusten typpipäästörajaksi on määrätty 3,5 g/kWh vuodesta 2021 alkaen, kun globaalisti valvonta-alueiden ulkopuolella päästöraja on 14,4 g/kWh. (Solakivi & Ojala, 2021) Kansainvälinen merenkulun järjestö (IMO) on päättänyt

jatkaa päästöjen valvonta-alueiden laajentamista, jossa seuraavana on luvassa Välimeren muuttaminen SECA-alueeksi toukokuussa 2025 (D’Mello, 2025).

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO pyrkii ohjaamaan säädöksillään meriliikennettä ja -kuljetuksia vähäpäästöisempään suuntaan. Aiemmin vuonna 2018 järjestön päästöleikkausstrategian tavoitteena on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 40 prosentilla vuoteen 2030 mennessä ja 70 prosentilla vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 päästötasoihin. Merenkulun päästöjen ennustetaan kuitenkin kasvavan nykyisellä regulaatiolla, huolimatta energiatehokkuuden paranemisesta. Gösslingin ym. (2021) mukaan suurin osa merenkulusta aiheutuvista päästöistä on regulaation ulkopuolella eli niitä ei ole vielä säännelty tarkasti. IMO on uusimmilla vuonna 2023 julkaistuilla päästötavoitteillaan osakseen vastannut mm. Solakiven ja Ojalan (2021) sekä Gösslingin ym. (2021) esille nostamiin huoliin regulaation vähyydestä. IMO:n meriympäristön suojelukomitea (MEPC) esittää, että meriliikenteen nettomääräiset kasvihuonekaasupäästöt ovat nollassa vuoteen 2050 mennessä. Välitavoitteiksi on asetettu kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen vähintään 20 % vuoteen 2030 mennessä ja vähintään 70 % vuoteen 2040 mennessä, verrattuna vuoden 2008 tasoihin (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2023).

2.3 Euroopan unioni päästöjen sääntelijänä

Euroopan unioni on tärkeässä asemassa merikuljetusten päästöjen vähentämisen reguloinnissa Kansainvälisen merenkulkujärjestön ohella. IMO:n päättäessä merikuljetusten globaaleista päästörajoituksista, toimii Euroopan unioni paikallisemmin, sillä unionissa tehtävät päätökset koskevat vain EU:n alueella liikennöiviä aluksia. Euroopan unionin päätöksillä päästöjen sääntelystä on silti laajamittaiset vaikutukset, sillä unionin jäsenmaiden satamien kautta kulki 3,4 miljardia tonnia tavaroita vuonna 2023. (Eurostat, 2024) EU on kehittänyt merikuljetuksia säädelläkseen yhdenmätyn meripolitiikan, joka pyrkii ohjaamaan kaikkia merialan politiikkatoimia. Yhdenmätyn meripolitiikan tarkoituksena on hyödyntää merialueita kestävästi, joka tukee merikuljetusten volyymien kasvua ja kehitystä. (Breuer & Twisk, 2025)

Euroopan vihreä kehitysohjelma (European Green Deal) on Euroopan komission vuonna 2019 esittelemä strategia, jonka tavoitteena on tehdä Euroopasta ensimmäinen ilmastoneutraali maanosa vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio, 2021a). Ohjelma muodostaa EU:n ilmastopolitiikan perustan ja ohjaa laajasti kaikkia politiikan sektoreita, kuten energiaa, liikennettä, teollisuutta ja maataloutta. Green Deal ei ole yksittäinen asetus tai direktiivi, vaan pitkän aikavälin toimintasuunnitelma, jonka toteutusta tukevat konkreettiset lainsäädäntöpaketit ja toimet. Ilmastoneutraaliuden saavuttaminen tarkoittaa sitä, että EU:n kasvihuonekaasupäästöjen nettopäästöt

ovat nolla, eli kaikista kasvihuonekaasupäästöistä hankkiudutaan eroon tai ne kompensoidaan. Green Deal korostaa tarvetta siirtyä kestäväan talouteen, jossa luonnonvarojen käyttö on tehokasta ja ympäristölle haitalliset vaikutukset minimoidaan.

Osana vihreän kehitysohjelman toimeenpanoa EU on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon (Euroopan komissio, 2021b). Tämän välitavoitteen saavuttamiseksi EU on laatinut lainsäädäntöpaketin nimeltä "Fit for 55", joka konkretisoi Green Deal -strategian käytännön tasolla. "Fit for 55" -lainsäädäntöpaketti sisältää joukon säädösehdotuksia, jotka kohdistuvat ilmastonmuutoksen kannalta keskeisiin sektoreihin, kuten energiaan, liikenteeseen, rakentamiseen ja teollisuuteen. Paketti kattaa muun muassa uusiutuvan energian tuotannon lisäämisen, energiatehokkuuden parantamisen, liikenteen ja rakennusten päästövähennykset sekä energiaverotuksen uudistuksen. (Euroopan komissio, 2021b)

Merkittävä osa Fit for 55 -kokonaisuutta on EU:n päästökauppajärjestelmän (EU ETS) laajentaminen uusille sektoreille, mukaan lukien meriliikenne, jonka päästöt on aiemmin jätetty pääosin kansainvälisen sääntelyn varaan (Euroopan komissio, 2021c). Meriliikenteen sisällyttäminen päästökauppaan on osa EU:n pyrkimystä ulottaa ilmastopolitiikka myös aloille, joilla päästöjen vähentäminen on ollut vaikeasti toteutettavaa. EU ETS on Euroopan unionin keskeinen ilmastopoliittinen työkalu, joka toimii markkinapohjaisena mekanismina kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Se kattaa noin 40 % EU:n kokonaispäästöistä ja perustuu "saastuttaja maksaa" -periaatteeseen. Järjestelmässä yritysten on hankittava päästöoikeuksia (EUA) kattamaan toimintansa hiilidioksidipäästöt – ja päästöoikeuksien määrä vähenee vuosittain, mikä kannustaa vähäpäästöisiin ratkaisuihin. (Euroopan komissio, 2021b)

Vuoden 2024 alusta alkaen EU ETS laajenee meriliikenteeseen vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa järjestelmä koskee EU:n sisäisiä merikuljetuksia kokonaisuudessaan sekä 50 % EU:n ja muiden maiden välisten matkojen päästöistä. Vuonna 2024 varustamoiden on katettava 40 % päästöistään päästöoikeuksilla, vuonna 2025 osuus nousee 70 prosenttiin ja vuodesta 2026 alkaen 100 prosenttiin. (Euroopan komissio, 2021a) Velvoitteet koskevat aluksi yli 5000 GT bruttovetoisuuden aluksia, ja laajentamista pienempiin aluksiin harkitaan myöhemmin. Päästökaupan piiriin kuuluu aluksi vain hiilidioksidipäästöt, mutta vuonna 2026 mukaan otetaan myös metaani- ja dityppioksidipäästöt. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2025) Tämän laajennuksen tavoitteena on ohjata merenkulun toimijoita investoimaan puhtaampiin teknologioihin ja vaihtoehtoisiin polttoaineisiin, sillä päästöoikeuksien hinta tuo taloudellista painetta vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Samalla

päästökauppa asettaa merikuljetuksille uudenlaisen taloudellisen kannustimen ympäristöystävälliseen toimintaan ja vahvistaa EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamista.

Meriliikenteen päästökaupan tueksi Euroopan unioni on ottanut käyttöön MRV-raportointijärjestelmän (Monitoring, Reporting and Verification), jonka avulla kerätään tarkkaa tietoa alusten kasvihuonekaasupäästöistä. Vuodesta 2018 lähtien yli 5000 GT bruttovetoisuuden alukset ovat olleet velvoitettuja seuraamaan ja raportoimaan vuosittain hiilidioksidipäästönsä, kuljetetun matkan, polttoainekulutuksen ja lastimäärät. Parlamentin asetusta MRV-raportoinnista laajennettiin vuodesta 2025 alkaen koskemaan myös kappaletavara-aluksia, joiden bruttovetoisuus on alle 5000 GT mutta vähintään 400 GT, ja öljynporauslauttojen toimintaa tukeviin offshore-aluksiin, joiden bruttovetoisuus on 400 GT tai enemmän. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2024) Tiedot on toimitettava komissiolle ja todennettava riippumattoman kolmannen osapuolen toimesta (Euroopan parlamentti & neuvosto, 2015). MRV-raportointijärjestelmä muodostaa teknisen perustan päästökaupan laajentamiselle meriliikenteeseen ja varmistaa, että päästöoikeuksia vaaditaan todellisten päästöjen mukaisesti. Se myös lisää alan läpinäkyvyyttä ja mahdollistaa varustamoiden vertailun ympäristösuorituksissa.

Tärkeänä osana Euroopan unionin Fit for 55-lainsäädäntöpakettia on FuelEU Maritime -asetus (FEUM). FuelEU Maritime -asetuksen tarkoituksena on kasvattaa uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käyttöä kansainvälisissä merikuljetuksissa. (Gundersen Skåre ym., 2024) FuelEU Maritime asettaa asteittain tiukentuvat vaatimukset alusten käyttämän energian kasvihuonekaasuintensiteetille. Asetuksen vaatimukset koskevat kaikkia EU tai ETA-alueella toimivia aluksia ja 50 % EU tai ETA alueen ulkopuolisista maista tulevia tai sinne suuntaavia aluksia. (Gundersen Skåre ym., 2024) FuelEU Maritimen kasvihuonekaasuintensiteetilaskennassa otetaan huomioon polttoaineen päästöt koko elinkaaren ajalta, joka tekee siirtymästä vähähiilisempiin polttoaineisiin hallitumpaa ja kokonaisvaltaisempaa. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2022) Ensimmäinen vaatimustaso astui voimaan 1.1.2025, jolloin alusten käyttämän energian päästöintensiteettiä tulee vähentää 2 % vuoden 2020 tasosta. Vähennysvaatimukset tiukentuvat asteittain, ja vuoteen 2050 mennessä tavoitteena on 80 % päästöintensiteetin aleneminen. (Euroopan komissio, 2021d) Polttoainevaatimukset koskevat kaikkia yli 5000 GT bruttovetoisuuden aluksia, jotka liikennöivät EU:n satamissa, riippumatta aluksen lippuvaltiosta. Yli 5000 tonnin bruttovetoisuuden alusten arvioidaan tuottavan 90 % kaikista meriliikenteen ilmastopäästöistä EU:ssa. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2022) FuelEU Maritime toimii yhdessä EU ETS:n kanssa muodostaen kokonaisvaltaisen ohjauskeinon meriliikenteen päästövähennyksille. EU ETS luo päästöille hinnan ja ohjaa varustamoja taloudellisesti päästöjen vähentämisessä, kun taas FuelEU

Maritime velvoittaa suoraan vähäpäästöisempien polttoaineiden ja energiatehokkaampien ratkaisujen käyttöönottoon.

3 Merikuljetusten perinteiset polttoaineet

Merikuljetukset ovat olennainen osa maailmanlaajuisia kaupankäyntiä, ja niiden energiantarve on perinteisesti katettu pääosin fossiilisilla polttoaineilla. Vaikka vaihtoehtoisten polttoaineiden ja vähähiilisten polttoaineiden kehitys on kiihtynyt viime vuosikymmenen aikana, suurin osa maailmalla seilaavista aluksista käyttää edelleen raskasta polttoöljyä, dieselpohjaisia polttoaineita ja niiden johdannaisia. (IMO, 2020; DNV, 2024) Laajuudeltaan fossiilisten polttoaineiden käyttö merikuljetuksissa on noin 220 miljoonaa öljytonniekviivalenttia (Mtoe). (Dos Santos ym., 2022)

DNV:n (2024) mukaan raskaat polttoöljyt, kuten HFO ja VLSFO kattavat edelleen yli 70 % merenkulun polttoaineiden kokonaiskulutuksesta, kun taas kevyempien tislepolttoaineiden, kuten meridieselöljyn (MDO) ja merikaasuöljyn (MGO) markkinaosuus on noin 20–25 %. Näitä polttoaineita kutsutaan perinteisiksi polttoaineiksi (eng. conventional fuels). (Gilbert ym., 2018) Vaihtoehtoisten polttoaineiden, kuten nesteytetyn maakaasun (LNG), metanolin, ammoniakkin ja biopolttoaineiden käyttö on yleistymässä, mutta tällä hetkellä niiden osuus kokonaiskulutuksesta on vain noin 5 %. (DNV, 2024)

3.1 Yleisimmät polttoainevaihtoehdot

Raskaat polttoöljyt, kuten raskas polttoöljy (HFO) ja vähärikkinen polttoöljy (LSHFO), ovat olleet pitkään meriliikenteen ensisijaisia polttoainevaihtoehtoja niiden kustannustehokkuuden ja laajan saatavuuden ansiosta. Vastaavasti tislattut polttoaineet, kuten meridieselöljy (MDO) ja merikaasuöljy (MGO), tarjoavat puhtaamman vaihtoehdon erityisesti pienemmille ja päästöjen valvonta-alueilla toimiville aluksille.

Polttoainevalinnat vaihtelevat aluksen tyypin, reitin, toimintaympäristön ja päästövaatimusten mukaan. Esimerkiksi raskaiden polttoöljyjen käyttö edellyttää tiettyjä teknisiä järjestelmiä kuten rikkipesureita päästömääräysten täyttämiseksi, kun taas kevyemmällä tislepolttoaineilla voidaan täyttää tiukemmat rikkidioksidipäästörajat ilman lisälaitteita.

Taulukossa 2. esitetään perinteisten meripolttoaineiden luokittelu, ja selitetään polttoaineen lyhenne, polttoainetyyppi, yleinen nimitys ja määritelmä.

Taulukko 2 Perinteisten meripolttoaineiden luokittelu (Dos Santos ym., 2022)

Lyhenne	Polttoainetyyppi	Yleinen nimitys	Määritelmä
MGO			Samanlainen kuin ajoneuvoissa käytettävä diesel
	Tisle	Kaasuöljy tai merikaasuöljy, meridieselöljy	
MDO			Sisältää seoksen raskasta polttoöljyä ja korkeamman osuuden merikaasuöljyä
IFO	Väliaste	Väliasteen polttoöljy	Samankaltainen kuin meridieselöljy, mutta seoksessa on käytetty enemmän raskasta polttoöljyä
HFO	Jäännösöljy	Raskas polttoöljy tai jäännöspolttoöljy	Heikkolaatuisin meripolttoaine. Korkeaviskoosinen jäännösöljy, joka vaatii esilämmityksen ennen käyttöä.

3.1.1 Jäännöspolttoöljyt

Jäännöspolttoöljyt ovat nimensä mukaisesti raakaöljyn tislauksjäännöstuotteita. (Gilbert ym., 2018) Jäännöspolttoöljystä meriliikenteen polttoaineena käytettävä termi on raskas polttoöljy (eng. heavy fuel oil, HFO). Sen käyttöhistoria ulottuu 1960-luvulle saakka. (Bengtsson ym., 2011) Raskaat polttoöljyt ovat kaikkein raskaimpia ja vähiten jalostettuja polttoaineita, sillä ne ovat lähes täysin pelkkää jäännösöljyä, eikä niihin ole sekoitettu puhtaampia polttoaineita, kuten väliasteen polttoaineisiin. Raskas polttoöljy sisältää korkean määrän epäpuhtauksia, kuten rikkiä (SO_x), typpeä (NO_x) ja hiilidioksidia (CO₂). (Øberg, 2013)

Raskaan polttoöljyn suosio perustuu sen edullisuuteen ja helppoon saatavuuteen. Vuonna 2007 noin 72 % kaikista meriliikenteessä käytettävistä fossiilista polttoaineista oli raskasta polttoöljyä. (Bengtsson ym., 2011) Meripolttoaineiden hintoja seuraavan sivuston Ship & Bunkerin (2025) mukaan vähärikkisen polttoöljyn globaali keskihinta kuluneen vuoden ajalta on noin 650 USD per metrinen tonni. HFO:n käyttöä on pyritty kuitenkin rajoittamaan sen korkeiden päästöjen takia. Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on hillinnyt raskaan polttoöljyn käyttöä erityisesti tiukentamalla rikkipäästörajoja. Vuoden 2020 rikkipäästörajan (0,5 %) myötä HFO:n käyttö on vähentynyt huomattavasti, jos aluksissa ei käytetä pakokaasujen puhdistusjärjestelmiä, kuten rikkipesureita. Rikkipesuri (eng. scrubber) on joko uuteen alukseen tai jälkiasennuksena vanhaan alukseen asennettu järjestelmä, joka puhdistaa pienhiukkasia ja rikin pakokaasuista. (Pöntynen & Lempiäinen, 2015) Rikkipesurin kasvattaa polttoaineen kulutusta noin 1–3 % ja vie lastitilaa aluksesta, mutta se myös mahdollistaa halvemman ja korkearikkisen polttoöljyn käytön aluksissa. (Pöntynen & Lempiäinen, 2015)

IMO:n asettamien rikkipäästörajoitusten tiukentumisen myötä on kehitetty myös useita kevyempiä polttoöljyjä (LFO) (Bilgili, 2023), jotka mahdollistavat alusten päästöjen vähentämisen ilman suuria muutoksia olemassa oleviin moottorijärjestelmiin. Näitä polttoaineita ovat erityisesti Low Sulphur Heavy Fuel Oil (LSHFO), Very Low Sulphur Fuel Oil (VLSFO) ja Ultra Low Sulphur Fuel Oil (ULSFO). (DNV, 2024) Vähärikkisten polttoaineiden käyttöönotto on ollut keskeinen askel merenkulun ympäristövaikutusten vähentämisessä, mutta niiden käyttöön liittyy myös haasteita, erityisesti polttoaineiden vakauten ja yhteensopivuuteen liittyen. Esimerkiksi VLSFO-sekoitusten kemiallinen koostumus voi vaihdella merkittävästi valmistajasta ja jalostamosta riippuen, mikä voi johtaa vakausongelmiin, kuten kerrostumiseen ja suodattimien tukkeutumiseen (Alfa Laval, 2018). Samoin ULSFO:n käyttö voi kohdata yhteensopivuusongelmia muiden polttoainelaatujen kanssa. Yhteensopimattomien polttoaineiden sekoittaminen voi aiheuttaa saostumia ja moottorihäiriöitä (Alfa Laval, 2018).

Jakeluinfrastruktuurin osalta raskaat polttoöljyt hyötyvät vakiintuneesta globaalista verkostosta. Raskasta polttoöljyä on laajasti saatavilla satamissa ympäri maailmaa, ja bunkrausjärjestelmät on suunniteltu tehokkaaseen raskaan polttoaineen toimitukseen. (DNV, 2024) Vahva jakeluinfrastruktuuri on ollut keskeinen tekijä polttoaineen käytön laajassa jatkumossa merenkulun pääpolttoaineena. Vaikka raskaan polttoöljyn taloudelliset ja logistiset edut ovat merkittäviä, sen käyttö kohtaa jatkuvaa painetta siirtyä vähäpäästöisempiin ja erityisesti vähähiilisiin vaihtoehtoihin tulevaisuuden päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi.

3.1.2 Tislatut polttoaineet ja väliasteen polttoöljyt

Tislatut polttoaineet voidaan jakaa kahteen eri polttoainetyyppiin, jotka ovat merikaasuöljy (eng. marine gas oil, MGO) ja meridieselöljy (eng. marine diesel oil, MDO). (Bilgili, 2023) Tislatut polttoaineet ovat fossiilisista polttoaineista kevyempiä vaihtoehtoja verrattuna raskaisiin jäännöspolttoöljyihin (HFO). (Corbett & Winebrake, 2008) Tislatut polttoaineet valmistetaan raakaöljyn kevyemmistä tislefraktioista ja ne sisältävät vähemmän epäpuhtauksia, kuten rikkiä ja raskasmetalleja (Chevron, 2007). Teknisiltä ominaisuuksiltaan merikaasuöljy ja meridieselöljy ovat viskositeetiltaan alhaisia ja niillä on korkea leimahduspiste (Nair, 2016). Nämä ominaisuudet mahdollistavat polttoaineen käytön ilman esilämmitystä, toisin kuin raskasta polttoöljyä käytettäessä. Merikaasuöljyä (MGO) voidaan myös käyttää SECA-alueilla, sillä sen rikkipitoisuus on enintään 0,1 % polttoaineen massasta.

Tislattujen polttoaineiden käytön suosio perustuu tarpeeseen siirtyä käyttämään vähäpäästöisempiä polttoaineita. Koska merikaasuöljy ja meridiesel palavat puhtaammin ja sisältävät vähemmän rikkiä kuin raskas polttoöljy, ei sen käyttö vaadi ylimääräisiä investointeja pakokaasun puhdistuslaitteisiin. Zisi ym. (2021) esittää artikkelissaan, että taloudellisesta näkökulmasta HFO:n käyttö yhdessä rikkipesurien kanssa olisi järkevämpää isoille aluksille kuin MGO:n käyttö, sillä HFO on huomattavasti halvempaa. Pienten aluksien ei ole kannattavaa hankkia pesureita, vaan käyttää tislattuja polttoaineita. (Zisi ym., 2021)

Tislatut polttoaineet ovat huomattavasti kalliimpia kuin raskaat polttoöljyt, mutta niiden etuna on yhteensopivuus olemassa oleviin moottoreihin, kuten HFO:n tapauksessa. (Bilgili, 2023) Ship & Bunkerin (2025) arvioiden mukaan merikaasuöljyn (MGO) kuluneen vuoden globaali keskihinta on noin 950 USD per metrinen tonni, joka tarkoittaa, että se on yli 46 % kalliimpaa kuin HFO.

Raskaan polttoöljyn ja tislattujen polttoaineiden välimuodoksi on luotu väliasteen polttoöljyt (eng. intermediate fuel oil, IFO). Väliasteen polttoöljyt eroavat meridieselistä, sillä niiden valmistuksessa käytetään enemmän raskasta polttoöljyä. Väliasteen polttoöljyt jaetaan kahteen alaluokkaan, joita ovat IFO 180 ja IFO 380. (Dos Santos ym., 2022) Corberttin ja Winebraken (2008) mukaan IFO 180 luokitellaan kevyeksi väliasteen polttoöljyksi ja IFO 380 raskaaksi väliasteen polttoöljyksi. Heidän mukaansa noin 75 % kaikesta myydystä polttoöljystä on luokitukseltaan raskasta ja loput 25 % kevyttä. Teknisiltä ominaisuuksiltaan ja käytettävyydeltään väliasteen polttoöljyt ovat hyvin lähellä raskaita polttoöljyjä. IFO:n viskositeetti on hyvin korkea, joten ne vaativat esilämmityksen, jotta öljyn pumppaus aluksen polttoainejärjestelmiin onnistuu. (Oiltanking) Kustannuksiltaan IFO 380 on

esitetystä perinteisistä polttoaineista halvinta sen korkeiden epäpuhtauksien takia. IFO 380 kuluneen vuoden globaali keskihinta on noin 590 USD per metrinen tonni. (Ship & Bunker, 2025)

3.2 Perinteisten polttoaineiden päästöt

Merikuljetuksissa perinteisesti käytettävien fossiilisten polttoaineiden suurimpina ongelmina on niiden korkeat päästöt, nousevat kustannukset ja riippuvuus öljyn saatavuuden rajoittumisesta. (Bilgili, 2023) Polttoaineiden päästöjä voidaan tutkia monin eri tavoin. Polttoaineiden päästöjä voidaan tutkia palamisessa vapautuessa tai koko polttoaineen elinkaaren ajalta. Palamisessa vapautuvien päästöjen tutkimus on keskittynyt pääosin arvioimaan hiilidioksidi- (CO_2), rikki- (SO_x) ja typpipäästöjä (NO_x). (Øberg, 2013) TEPA-termipankin mukaan elinkaariarviointi on menetelmä, jossa selvitetään, mitä ympäristövaikutuksia tuotteella tai toiminnalla on sen koko elinkaaren ajan. Elinkaariarviointi (eng. life cycle assessment) tai lyhyemmin LCA on laajasti käytetty menetelmä meriliikenteen polttoaineiden ympäristövaikutuksia tutkittaessa. Polttoaineen päästöjä tutkitaan kolmella eri aikajänteellä: käytön aikaiset päästöt (eng. Tank-To-Wake, TTW), valmistuksen ja jakelun aikaiset päästöt (eng. Well-To-Tank, WTT) ja koko elinkaaren aikaiset päästöt (eng. Well-To-Wake, WTW). (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2022) Kuvassa 2 esitetään polttoaineen koko elinkaarta (WTW) tutkittaessa analysoitavat prosessit.



Kuva 2 WTW-analyysissä arvioitavat prosessit (Øberg, 2013)

Corbettin ja Winebraken (2008) tutkimuksen mukaan suurin osa perinteisten merikuljetuksissa käytettävien fossiilisten polttoaineiden päästöistä sijoittuu elinkaaren operationaaliseen vaiheeseen,

eli polttoaineen käyttämiseen (TTW). Perinteisten polttoaineiden käytön aikaiset päästöt ovat noin 86,3–89,8 % kaikista elinkaaren aikaisista päästöistä. Kuvassa 2 esitetyt muut prosessit tuottavat elinkaaren aikaisista päästöistä noin 6,7–10,2 %. Bengtssonin ym. (2011) mukaan fossiilisen polttoaineen elinkaaren käyttövaiheen (TTW) ympäristövaikutukset ovat 50–99 % kaikista elinkaaren ympäristövaikutuksista.

Polttoaineen elinkaaripäästöjen laskennassa kasvihuonekaasupäästöjen muuttaminen hiilidioksidiekvivalenteiksi on tärkeää. International Council on Clean Transportation eli ICCT (2021) on määrittänyt raportissaan tärkeimmiksi päästöiksi hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄), typpioksidin (N₂O) ja mustan hiilen (BC). He tutkivat päästöjä kahdenkymmenen vuoden ja sadan vuoden ajanjaksoilla, joka vaikuttaa päästöjen Global Warming Potential (GWP)-kertoimiin. Taulukossa 3 esitetään tärkeimpien merikuljetuksista aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen GWP-kertoimet.

Taulukko 3 Kasvihuonekaasujen GWP-kertoimet (International Council on Clean Transportation, 2021)

Kasvihuonekaasu	100 vuoden GWP	20 vuoden GWP
CO ₂	1	1
CH ₄	36	87
N ₂ O	298	268
BC	900	3200

Meripolttoaineiden elinkaaripäästöjen määrään vaikuttaa myös moottorityyppi. Perinteisten fossiilisten polttoaineiden moottorityypit voidaan jakaa kahteen luokkaan: hidaskäyntisiin dieselmootoreihin (eng. slow speed diesel, SSD) ja keskinopeisiin dieselmootoreihin (eng. medium speed diesel, MSD). (International Council on Clean Transportation, 2021)

Taulukossa 4 esitetään raskaan polttoöljyn (HFO), vähärikkisen polttoöljyn (VLSFO) ja merikaasuöljyn (MGO) koko elinkaaren aikaiset hiilidioksidipäästöt grammoina per gramma polttoainetta. Taulukossa esitettävät CO_{2e100} ja CO_{2e20} huomioivat myös muut kasvihuonekaasut ja ilmaisevat niiden lämmityspotentiaalin (eng. global warming potential, GWP) kahdenkymmenen ja sadan vuoden aikajänteellä.

Taulukko 4 Perinteisten meripolttoaineiden koko elinkaaren hiilidioksidi- ja hiilidioksidiekvivalenttipäästöt (International Council on Clean Transportation, 2021)

Polttoaine	Moottorityyppi	WTW-päästöt (g/g polttoainetta)		
		CO ₂	CO ₂ e100	CO ₂ e20
HFO	SSD	3,545	3,915	4,553
	MSD	3,545	4,182	5,510
VLSFO	SSD	3,734	4,124	4,787
	MSD	3,734	4,391	5,744
MGO	SSD	3,782	4,043	4,367
	MSD	3,782	4,237	5,068

Taulukosta 4 voidaan huomata, että aliarvioimme kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärän huomattavasti, jos keskitymme vain polttoaineen elinkaaren aikaisiin hiilidioksidipäästöihin (CO₂). Huomaamme myös, että vähärikkisemmät polttoaineet VLSFO ja MGO tuottavat elinkaarensa aikana enemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin epäpuhtaana tunnettu HFO. Pääasiallisena ajurina VLSFO:n ja MGO:n käyttöön on ollut rikki-päästöjen rajoittaminen käytännössä nollassa ECA-alueilla. IMO:n asettamat rikin päästöajotukset voidaan nähdä tietynlaisena kompromissina. Vähärikkisten polttoaineiden käyttö lisää ilmaston lämpenemistä edistäviä kasvihuonekaasupäästöjä, mutta niiden käyttö on ihmisten terveydelle parempi vaihtoehto.

4 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Vaihtoehtoiset polttoaineet voivat tarjota ratkaisun päästötavoitteisiin pääsemiseksi ja korvata täten konventionaaliset fossiiliset polttoaineet kokonaan tulevaisuudessa. DNV (2024) esittää raportissaan kaikista lupaavimmiksi vaihtoehtoisiksi merikuljetusten polttoaineiksi nesteytettyä maakaasua (LNG), metanolia, vetyä ja biopolttoaineita.

Nesteytetty maakaasu (eng. liquefied natural gas, LNG) on suosittu vaihtoehto konventionaalisille meripolttoaineille, sillä se sen kasvihuonekaasupäästöt ovat jopa 30 % alhaisemmat kuin konventionaalisilla meripolttoaineilla (Aakko-Saksa ym., 2023). Metanoli on toinen lupaava vaihtoehto, sillä sitä voidaan tuottaa uusiutuvista lähteistä ja käytöstä syntyy huomattavasti vähemmän päästöjä kuin konventionaalisista polttoaineista (Brynnolf ym., 2014). Ammoniakki ei vapauta palaessaan ollenkaan hiilidioksidi, rikki- ja pienhiukkaspäästöjä, mutta sen tuotanto ja käyttöönotto tuottavat haasteita (Wärtsilä, 2023). Vety on myös lupaava päästötön vaihtoehtoinen polttoaine suorien CO₂-päästöjen näkökulmasta (Dos Santos ym., 2022; Solakivi & Ojala, 2021), jos se tuotetaan uusiutuvista lähteistä, kuten tuuli- ja aurinkoenergiaa hyödyntäen. Vety on kuitenkin haastava polttoaine varastoida ja kuljettaa aluksilla sen alhaisen tiheyden vuoksi ja se vaatii merkittäviä investointeja infrastruktuuriin ja moottoreihin. (Christodoulou & Cullinane, 2022) Lisäksi biopolttoaineet, kuten nesteytetty biokaasu (LBG) ja biodiesel, ovat hyviä vaihtoehtoja meripolttoaineiksi, sillä niitä pidetään elinkaaripäästöiltään hiilineutraaleina (Bengtsson ym., 2012).

Tässä luvussa tarkastellaan kutakin vaihtoehtoista polttoainetta kolmesta näkökulmasta, ottaen huomioon niiden ympäristövaikutukset, taloudellinen näkökulma sekä käyttövalmius merikuljetuksissa.

4.1 Ammoniakki

Ammoniakki eli NH₃ on väritön ja myrkyllinen kaasu. Ammoniakki hiilivapaa yhdiste ja se koostuu typestä (N) ja vedystä (H). Ammoniakki toimii vedyn kuljettajana ja sen painosta 17,6 % on vetyä. Kemiallisena yhdisteenä ammoniakki on erittäin reaktiivinen ja sitä käytetään laajasti teollisuudessa. Vuonna 2019 ammoniakin maailmanlaajuinen tuotantomäärä oli noin 150 miljoonaa tonnia, josta noin 80 % valmistettiin lannoitteiden raaka-aineeksi. Muita ammoniakin käyttökohteita on synteettiset kuidut, muovit, räjähteet, kylmäaineet ja jotkin kemikaalit. (Inal ym., 2022)

4.1.1 Päästöt

Ammoniakkia pidetään hiilivapaana polttoaineena, riippuen sen valmistuksessa käytettävistä energialähteistä (Inal ym., 2022). Ammoniakin raaka-aineen vedyn tuotanto on hyvin keskittynyt

fossiilisiin polttoaineisiin. Ammoniakkisynteesiin käytettävästä vedystä 72 % tuotetaan maakaasulla, 22 % hiilellä, 1 % raskaalla polttoöljyllä, 1 % teollisuusbensinillä ja 1 % jalostamo- ja koksiiunikaasulla. (Bicer ym., 2017) Yleisin kaupallinen ammoniakkin valmistustapa on Haber–Bosch-menetelmä, jossa ammoniakki valmistetaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa katalyytin, yleisimmin raudan kanssa (Bicer & Dincer, 2018). Haber–Bosch-menetelmässä yleisimmin käytetty fossiilinen polttoaine on maakaasu (Bicer ym., 2017). Jos ammoniakki tuotetaan kokonaan uusiutuvalla energialla, ammoniakki on koko elinkaareltaan hiilivapaa polttoaine (Inal ym., 2022). Ammoniakkia voidaan kutsua vihreäksi tai e-ammoniakiksi (eng. electro-ammonia), jos sen tuotantoon käytettävä vety on valmistettu vedestä elektrolyysin avulla ja yhdistetty ilmakehästä kaapattuun typpeen (Fullonton ym., 2025, 4).

Vaikka ammoniakki ei tuota palaessaan lainkaan CO₂-päästöjä, aiheutuu sen käytöstä kuitenkin negatiivisia ympäristövaikutuksia, kuten typpipäästöjä (NO_x). Ammoniakin palamisesta aiheutuvat typpipäästöt voivat olla korkeammat kuin konventionaalisten polttoaineiden. Polttomoottorissa (eng. internal combustion engine, ICE) käytettävän ammoniakkin typpipäästöjä voidaan vähentää käyttämällä selektiivistä katalyyttistä pelkistämistä (eng. selective catalytic reduction, SCR), jossa typen oksideja vähennetään katalysaattorilla. SCR-tekniikan avulla voidaan poistaa jopa 95 % typen oksideista. (Fullonton ym., 2025, 5) SCR-tekniikka ei kuitenkaan täysin poista riskiä ammoniakkin vuotamisesta ilmakehään (eng. ammonia slip), vaan itseasiassa lisää ammoniakkipäästöjä hieman (Brynnolf, 2014, 61–62). Polttomoottoreissa ammoniakkin palamisella on merkittäviä ympäristövaikutuksia, kuten happamoitumista, meren rehevöitymistä, valokemiallisen otsonin muodostumista ja pienhiukkaspäästöjä (Kanchiralla ym., 2022, 12527).

4.1.2 Polttoaineen kustannukset

Ammoniakin kustannukset voivat olla merkittävä este sen laajamittaiselle käyttöönotolle merikuljetuksissa. Kustannuksia tarkastellessa on otettava huomioon useita tekijöitä, kuten polttoaineen tuotantotekniikat, energiankulutus, raaka-aineiden hinnat ja kehittämiskustannukset. (Xing ym., 2021) Vihreän ammoniakkin polttomoottoreissa (ICE) käyttämisen kokonaiskustannukset ovat arvioiden mukaan noin 2,5–3 kertaa korkeammat kuin merikaasuöljyn (MGO) (Kanchiralla ym., 2022). Vihreän ammoniakkin hinta on noin 700 USD per metrinen tonni (Schreuder ym., 2025). Ammoniakin kustannuksissa tulee ottaa myös huomioon sen energiatiheys. Ammoniakin energiatiheys on vain noin 42 % meridieselöljyn energiatiheudesta, jolloin saman matkan kulkeakseen alus tarvitsee ammoniakkia noin 2,5 kertaisen määrän verrattuna meridieselöljyyn (Forbes, 2024). Ammoniakin kustannukset tulevat todennäköisesti laskemaan tulevaisuudessa, jos

sen tuotantoa laajennetaan ja sen käytön skaalautuvuus paranee. Skaalautuvuutta hidastaa kuitenkin tämänhetkiset korkeat infrastruktuuriin ja investointeihin liittyvät kustannukset. (Schreuder ym., 2025)

4.1.3 Käyttövalmius

Ammoniakkia voidaan käyttää suoraan nykyisissä polttomoottoreissa (ICE) tai polttokennoissa (Bicer & Dincer, 2018). TEPA-termipankin määritelmän mukaan polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuttaa polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi hapettamalla. Ammoniakin alhaisesta energiatiheydestä johtuva suurempi tilavaatimus aluksissa rajoittaa sen käyttöä pitkien välimatkojen merikuljetuksissa (Solakivi & Ojala, 2021). Lisäksi Solakivi ja Ojala (2021) esittää huolen ammoniakin turvallisesta käytöstä, sillä sisäinen vuoto aluksella olisi katastrofaalista miehistön kannalta, ja ulkoinen vuoto olisi hyvin myrkyllistä vedessä ja ilmassa. Ammoniakin käyttö on ollut tähän mennessä kokeellista, ja sen testauksessa on käytetty merkittäviä määriä toissijaista polttoainetta, ja ammoniakin osuus sekoituksessa on jäänyt alhaiseksi (Solakivi & Ojala, 2021, 39). Ammoniakin käyttö polttomoottoreissa vaatii pilottipolttoaineen (maakaasu tai vety) käyttöä, joka auttaa pääasiallista polttoainetta syttymään, sillä ammoniakki ei ole syttyvää ilmassa. Tämä toisaalta vähentää räjähdysriskiä, mutta lisää päästöjä. Ammoniakin käyttö polttoaineena vaatii myös uusia polttoainesäiliöitä aluksiin sen syövyttävien ominaisuuksien takia. Ammoniakkia voidaan säilöä nestemäisenä normaalissa ilmakehän lämpötilassa 10 baarin paineessa tai normaalissa ilmanpaineessa -34 °C lämpötilassa. (McKinlay ym., 2021, 28285)

4.2 Metanoli

Metanoli tai metyylialkoholi (CH_3OH) on hiilestä (C), vedystä (H) ja hapesta (O) koostuva myrkyllinen alkoholi. Metanolin tuotanto on laajamittaista ja sen globaali tuotantomäärä vuosittain on noin 98 miljoonaa tonnia. Arvioiden mukaan 30 % kaikesta tuotetusta metanolista käytetään teollisten höyry- ja kuumavesikattiloiden polttoaineena, kuljetussektorilla laivoissa ja ajoneuvoissa sekä ruoanlaittoliesissä. Loput noin kaksi kolmasosaa tuotetusta metanolista käytetään kemianteollisuudessa muiden kemikaalien raaka-aineena. (Tabibian & Sharifzadeh, 2023)

4.2.1 Päästöt

Metanolin kemiallisen koostumuksen ansiosta sen käyttö polttoaineena vähentää ilmaston vapautuvia päästöjä verrattuna raskaaseen polttoöljyyn ja merikaasuöljyyn. Maailman ensimmäisen täysin metanolilla kulkeva alus Stena Germanica on laskenut rikkipäästöjään 99 %, typpipäästöjä 60 %, pienhiukkaspäästöjä 95 % ja hiilidioksidipäästöjä 25 %. (Balcombe ym., 2019) Gilbert ym. (2019,

861) esittää kuitenkin tutkimuksessaan, että metanolin koko elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasut ovat noin 12–15 % korkeammat kuin konventionaalisilla meripolttoaineilla. Metanolin käytön todelliset ilmastohyödyt saataisiin esiin vain, jos metanoli tuotetaan kokonaan biomassasta (Brynolf ym., 2014; Gilbert ym., 2018). Tällä hetkellä uusiutuvista lähteistä tuotetun metanolin osuus kaikesta tuotetusta metanolista on vain noin 0,2 % (Tabibian & Sharifzadeh, 2023).

4.2.2 Polttoaineen kustannukset

Metanolin hinta riippuu sen tuotantotavoista. Metanolin suurimman tuottajan Methanexin vuoden tämänhetkinen hinta Euroopassa on 625 euroa per metrinen tonni. Kalleinta metanoli on Pohjois-Amerikassa, jossa metrisen tonnin hinnaksi tulee 891 USD. Halvinta metanoli on Kiinassa, jossa se maksaa 400 USD per metrinen tonni. (Methanex, 2025) Methanexin tuottama metanoli on ”harmaata”, eli se tuotetaan fossiilisen energian avulla (Methanex, 2024). Tabibian ja Sharifzadeh (2023) arvioi, että uusiutuvan metanolin tuotantokustannukset laskevat vuoteen 2050 mennessä hintaan 250–650 USD per metrinen tonni, johtuen uusiutuvan energian hinnan laskusta.

4.2.3 Käyttövalmius

Metanolin käyttö polttoaineena vaatii enemmän säiliötilaa kuin konventionaaliset polttoaineet. Säiliötilan todellinen tarve on aluskohtaista, jonka takia tarkkaa säiliötilavuutta on vaikea arvioida yleisellä tasolla (Brynolf ym., 2014). Nykyiset alukset vaatisivat myös muita muutoksia. Denisin ja Zincirin (2016) mukaan aluksien muutostarpeita ovat lisätilan hankkiminen polttoaineen pumppausjärjestelmiä varten, kaksiseinäisten putkistojen rakentaminen, jotta metanolia voidaan syöttää moottorille sekä polttoaineruiskujen määrän lisääminen. Polttomoottorien lisäksi metanolia voidaan käyttää polttokennoissa (Brynolf ym., 2014). Polttokennoissa metanoli tuottaa CO₂-päästöjä, mutta niiden kaappaus ja säilöminen on huomattavasti helpompaa kuin polttomoottoreissa (McKinlay ym., 2021). Metanolia voidaan käyttää myös sekoituksena dieselin kanssa, jossa diesel toimii pilottipolttoaineena. Metanoli-diesel-moottorikonsepti on halvempi ja helpompi jälkiasentaa nykyisiin aluksiin, mutta sen käytöstä aiheutuvat typpipäästöt eivät yllä IMO:n kireimpiin Tier III -typpipäästörajoituksiin. (Brynolf ym., 2014) Metanolin bunkraus eli tankkaus on rajoittunutta sen vähäisen käytön takia. Metanolin käytön yleistymisen globaaleilla kuljetusreiteillä vaatisi parempia bunkrausmahdollisuuksia, mutta samalla bunkrausmahdollisuuksien parantuminen vaatisi metanolin käytön yleistymistä merikuljetuksissa. (Deniz & Zincir, 2016)

4.3 Vety

Vety molekyyli (H_2) on kaasu, joka on kemialliselta koostumukseltaan hiiletön. Hiilettömyys tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon merikuljetusten tulevaisuuden polttoaineeksi. Vedyllä on kaasumaisen olomuotonsa takia volyymiltään alhainen energiatiheys, joka on sen merkittävin haittapuoli polttoainekäytössä. (Inal ym., 2022) Vedyn kysyntä oli noin 97 miljoonaa tonnia vuonna 2023 (IEA, 2024b). Vedyn puhtain muoto (H) kattaa noin 60 % kaikesta sen kysynnästä, ja sitä käytetään pääasiassa öljynjalostuksessa ja ammoniakkin tuotannossa. Loput 40 % kysynnästä käytetään pääosin terästeollisuudessa ja metanolin tuotannossa. (Al-Enazi ym., 2021)

4.3.1 Päästöt

Vety on sen kemiallisen koostumuksensa ansiosta kasvihuonekaasupäästötön, sillä sen käyttö polttokennoissa tuottaa ”pakokaasuna” vain vesihöyryä. Kuten muidenkin vaihtoehtoisten polttoaineiden kanssa, myös vedyn elinkaaripäästöihin vaikuttaa sen tuotantotavat. Inalin ym. (2022, 19891) mukaan tällä hetkellä vetyä valmistetaan 96-prosenttisesti fossiilisista raaka-aineista, joista 48 % on maakaasua, 30 % öljyä ja 18 % hiiltä. Heidän mukaansa vain 4 % vedystä tuotetaan uusiutuvista lähteistä. Vetyä voidaan valmistaa vedestä elektrolyysillä käyttämällä uusiutuvaa energiaa, kuten aurinko- tai tuulivoimaa. Myös valmistus biomassasta on päästöiltään vähäinen vaihtoehto, joskin se ei ole vielä tarpeeksi kehittynyt laajempaa käyttöä varten. (Inal ym., 2022) Tällä hetkellä päästöttömän vedyn valmistamisen esteenä on elektrolyysin kannattamattomuus, sillä sen hyötysuhde on noin 60–70 %, jolloin noin kolmasosa valmistukseen käytetystä sähköstä menee hukkaan lämpönä (Fortum, 2020). Vihreän vedyn tuotannon arvioidaan muuttuvan kustannustehokkaaksi vuoteen 2035 mennessä (Pomaska & Acciaro, 2022). Hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä vety tuottaa aluksissa noin 0,98 grammaa per tonnikipometri, kun raskas polttoöljy tuottaa niitä noin 5,33 grammaa per tonnikipometri (Bicer & Dincer, 2018)

4.3.2 Polttoaineen kustannukset

Vedyn arvioitu hinta on noin 0,06–0,24 USD per kilowattitunti, keskihinnan ollessa noin 0,12 USD/kWh, riippuen sen valmistukseen käytetyistä raaka-aineista. Vertailun vuoksi fossiilisen merikaasuöljyn (MGO) kilowattituntihinta oli noin 0,04 USD/kWh vuonna 2017. (Balcombe ym., 2019) Fossiilisista lähteistä valmistetun nesteytetyn vedyn (LH_2) hinnan arvioidaan olevan noin 3–5 kertaa kalliimpaa ja uusiutuvista lähteistä valmistetun nesteytetyn vedyn noin 5–16 kertaa kalliimpaa kuin ULSFO:n. (Pomaska & Acciaro, 2022) Tonnihinnaltaan vihreä vety maksaa noin 3500–6000 USD ja se on tällä hetkellä kallein meripolttoaine. Teoriassa siis vetykäyttöisen erittäin suuren

konttialuksen (ULCV) päivittäiset polttoainekustannukset noin 275000–471600 USD, kun polttoaineenkulutus on 78,6 tonnia päivässä. (Ship & Bunker, 2025)

4.3.3 Käyttövalmius

Vedyn hyödyntämisen suurin potentiaali merikuljetuksissa on vasta tulevaisuudessa, sillä sen käyttö rajoittuu tällä hetkellä vasta yksittäisiin testiprojekteihin ja -aluksiin (Solakivi & Ojala, 2021). Vetyä voidaan käyttää polttomoottorissa sekoitettuna perinteisiin polttoaineisiin ammoniakkin lailla. Puhdasta vetyä voidaan käyttää myös polttokennoissa. (Inal ym., 2022) Nykyisissä dieselmootoreissa vetyä ei voida käyttää tehokkaasti pääpolttoaineena, sillä se aiheuttaa moottorissa epänormaalia nakutusta (Deniz & Zincir, 2016).

Vedyn käyttöönottoon negatiivisesti vaikuttava tekijä on sen säilömiseen vaadittava tila. Yleisin tapa säiliöä vetyä on paineistamalla se jopa 700 baariin. Vetyä voidaan säiliöä ja kuljettaa myös nesteenä. Nestemäinen vety vaatii kryogeenisistä säilömistä, jossa vedyn lämpötila on -254 °C (Balcombe ym., 2019). Denizin ja Zincirin (2016) mukaan kaasuna kuljetettava paineistettu vety vaatii kuudesta seitsemään kertaa enemmän tilaa kuin saman energiasisällön omaava HFO. Molemmissa säilömistavoissa aluksiin tehtävät muutokset ovat mittavia. Balcomben ym. (2019) mukaan vetykaasun polttoainesäiliöt syrjäyttävät lastitilaa 372 kontin verran (14340 m^3) ja nestemäisen vedyn polttoainesäiliöt 180 kontin (6939 m^3) verran aluksessa, jonka toimintasäde on 5,1 vuorokauden mittainen. Vetysäiliöiden tilatarve voi rajoittaa sen käyttöä kaukoliikenteessä (Solakivi & Ojala, 2021).

4.4 Nesteytetty maakaasu (LNG)

Nesteytetty maakaasu (eng. liquefied natural gas, LNG) on saanut laajaa kiinnostusta merikuljetusten polttoaineena, sillä se sisältää vähemmän rikkiä ja hiiltä ja tuottaa palasessa vähemmän typpipäästöjä kuin perinteiset merikuljetusten polttoaineet kuten HFO (Brynolf ym., 2014). Maakaasu on fossiilinen polttoaine, joka koostuu pääasiassa metaanista (CH_4) (Fun-sang Cepeda ym., 2019), ja se on väritöntä, hajutonta ja se ei ole myrkyllistä eikä syövyttävää. Maakaasu nesteytetään viilentämällä se kryogeeniseen -162 °C lämpötilaan. Nestemäisessä olomuodossa maakaasu vie 600 kertaa vähemmän tilaa kuin sen kaasumainen olomuoto, joka helpottaa sen kuljettamista huomattavasti. (Balcombe ym., 2019, 75) LNG:n vuosittainen tuotantokapasiteetti on nousussa ja sen odotetaan saavuttavan 666,5 miljoonaa metristä tonnia vuoteen 2028 mennessä (IEEFA, 2024).

4.4.1 Päästöt

Nesteytetyllä maakaasulla voidaan saavuttaa merikuljetuksille asetetut SO_x- ja NO_x-päästörajoitukset sekä vähentää samalla kuljetuksista aiheutuvia CO₂-päästöjä (Balcombe ym., 2019). Yhteensä LNG:n kasvihuonekaasujen päästövähennyspotentiaali on välillä 5–30 % verrattuna raskaaseen polttoöljyyn (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2022).

Nesteytetyn maakaasun päästövähennyspotentiaalia vähentää kuitenkin sen käytössä vapautuva palamaton metaani. Tätä ilmiötä kutsutaan metaanivuodoksi (eng. methane slip). Metaani aiheuttaa 25–30 kertaisen kasvihuonekaasuilmion verrattuna hiilidioksidiin. (Fun-sang Cepeda ym., 2019, 78) Huonoimmassa tapauksessa metaanivuoto voi kumota LNG:n muut ympäristöhyödyt (Ramsay ym., 2023). Metaanivuoto voidaan kuitenkin eliminoida kokonaan kaksitahtimoottoreissa ja vähentää minimiin uusissa kehittyvissä nelitahtimoottoreissa (Deniz & Zincir, 2016, 442).

4.4.2 Polttoaineen kustannukset

LNG:n hinta ei riipu muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden tavoin sen tuotantotavoista, sillä se on fossiilinen polttoaine, jota valmistetaan maakaasusta. LNG:n hintaan suurin vaikuttava tekijä on siis maakaasun hinta. LNG on hinnaltaan parhaimmaksi todettu vaihtoehtoinen polttoaine. Fossiilisiin polttoaineisiin liittyvä hiilidioksidivero voi vaikuttaa LNG:n hintaan, mutta veron tulisi olla yli 300 USD per metrinen tonni, jotta sillä olisi merkittävää vaikutusta LNG:n suosioon. (Hansson ym., 2019) Tällä hetkellä LNG:n hinta vaihtelee satamittain ympäri maailmaa. Halvin LNG löytyy Yhdysvaltojen kaakkoisrannikolta, jossa maaliskuun keskihinta oli 685,72 USD per metrinen tonni. Kalleinta LNG on maaliskuussa ollut Barcelonassa, jossa hinta oli 830,87 USD per metrinen tonni. Keskimäärin nesteytetyn maakaasun metrisen tonnin hinta on noin 750–800 USD. (S&P Global, 2025)

4.4.3 Käyttövalmius

LNG-teknologiaa on ollut käytössä merikuljetuksissa jo pitkään. Ensimmäiset nesteytetyllä maakaasulla toimivat alukset rakennettiin jo vuonna 2000. (Balcombe ym., 2019, 76) LNG-alusten kehitys on ollut nopeaa, sillä vuonna 2017 aluksia oli 117 kappaletta (Balcombe ym., 2019) ja vuonna 2024 niiden määrä on jo 638 (Lloyd's List, 2025). Nesteytetty maakaasu on siis jo laajalti käytössä merikuljetusten polttoaineena ja sen suosio on kasvamaan päin.

Nesteytettyä maakaasua voidaan käyttää kaasutoimisissa polttomoottoreissa tai dual-fuel moottoreissa, jossa LNG sekoitetaan pilottipolttoaineen kanssa sytytyksen helpottamiseksi (Ramsay ym., 2023). Dual-fuel moottorit ovat kaksoispolttoainemoottoreita, jotka toimivat kaasumaisilla ja

nestemäisillä polttoaineilla (Wärtsilä, ei pvm.). Mahdollisuus käyttää nesteytettyä maakaasua dual-fuel moottoreissa tekee siitä helpommin nykyisiin aluksiin mukautuvan.

Nesteytetyn maakaasun jakeluinfrastruktuuri on vankka verrattuna muihin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin. Euroopan unionin Fit for 55-ilmastopakettiin on sisällytetty vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuuria koskeva direktiivi, jossa veloitetaan TEN-T-ydinverkkoon (eng. Trans European Transport Network) eli Euroopan laajuiseen liikenneverkkoon kuuluvia satamia järjestämään LNG:n riittävät tankkausmahdollisuudet 1.1.2025 alkaen. Nesteytettyä maakaasua voidaan tankata tankkiautosta tai LNG-bunkrausalueesta. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2022)

LNG:n käyttöönottoa vaikeuttavina puolina on esimerkiksi polttoainesäiliöiden koko. LNG:n säilöminen vaatii kaksi kertaa enemmän tilaa kuin raskaan polttoöljyn, sillä se on tiheydeltään alhaisempaa (Deniz & Zincir, 2016, 440). Suuremman tilatarpeen lisäksi polttoainesäiliöt ovat teknisesti monimutkaisempia, sillä nesteytettyä maakaasua tulee säilöä kryogeenisesti. Brynolfin ym. (2014) mukaan LNG-teknologian jälkiasennus nykyisiin aluksiin voi olla kallista.

4.5 Biopolttoaineet

Biopolttoaineet ovat uusiutuvista raaka-aineista valmistettuja polttoaineita. Biopolttoaineiden päästövähennyspotentiaali on 25–100 %, eli parhaassa tapauksessa ne ovat täysin hiilineutraaleita (Issa ym., 2022). Biopolttoaineiden hiilineutraalius voidaan saavuttaa, jos ne valmistetaan uusiutuvasta biomassasta. Biomassa sitoo kasvaessaan itseensä hiilidioksidia, ja sen polttaminen vapauttaa sitä vastaavan määrän takaisin ilmakehään. (Bengtsson ym., 2012) Biopolttoaineet voidaan jakaa ensimmäisen ja toisen sukupolven polttoaineisiin. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet valmistetaan biomassasta, joka koostuu maatalouskasveista kuten viljoista ja öljykasveista tai muista elintarviketuotannon raaka-aineista. Toisen sukupolven biopolttoaineiden valmistukseen käytettävä biomassa on peräisin puupohjaisista materiaaleista tai jätteistä, jotka sisältävät lignoselluloosaa. (Bengtsson ym., 2012, 452)

Biopolttoaineet voidaan jakaa myös olomuodon mukaan dieselpolttoaineisiin ja kaasupolttoaineisiin. Bengtsson ym. (2012) esittävät, että biodiesel kuten FAME (eng. fatty acid methyl ester) voi olla osana asteittaista siirtymää perinteisistä raskaista polttoöljyistä kohti pelkkien biopolttoaineiden käyttöä. Kaasupolttoaineiden kohdalla siirtymä fossiilisesta nesteytetystä maakaasusta kohti biopolttoaineita tehtäisiin nesteytetyn biokaasun (eng. liquified biogas, LBG) kanssa.

Tällä hetkellä biopolttoaineita käytetään pääasiassa muissa tarkoituksissa kuin merikuljetuksissa. Nestemäisten biopolttoaineiden globaali tuotantomäärä oli noin 111 Mtoe ja biokaasujen noin 41

Mtoe vuonna 2023. Nestemäisistä biopolttoaineista 98,9 % käytettiin tiekuljetuksiin ja vain 0,6 % merikuljetuksiin. Suurin osa biokaasuista käytettiin sähkön ja lämmön tuotantoon ja vain 7 % kuljetussektorilla. (DNV, 2025)

4.5.1 Päästöt

Biopolttoaineiden päästöt vaihtelevat raaka-aineiden ja tuotantoprosessien mukaan. Biopolttoaineet sisältävät vähemmän hiiltä, enemmän happea ja hyvin pienen määrän rikkiä. Typpipäästöt eivät eroa perinteisistä polttoaineista, sillä niiden muodostumista kontrolloidaan moottorin palamislämpötilalla. (Righi ym., 2011, 3520) Biodiesel voi vähentää CO₂-päästöjä jopa 80 % verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin. Parhaimmillaan biopolttoaineet ovat täysin hiilineutraaleita (Issa ym., 2022). Toisen sukupolven biopolttoaineet, kuten biokaasu, voivat tarjota entistä pienempiä päästöjä, koska ne tuotetaan biomassan jätteistä, kuten maatalousjätteistä ja puujätteistä, jotka muuten mätänisivät kaatopaikoilla tuottaen metaania ilmakehään. Nesteytetyn biokaasun (LBG) päästövähennyspotentiaali on noin 50 % verrattuna raskaaseen polttoöljyyn (Bengtsson ym., 2012, 460). Bengtsson ym. (2012) esittää tutkimuksessaan myös, että kaasumaiset biopolttoaineet ovat ympäristön kannalta kokonaisuutena parempi vaihtoehto kuin nestemäiset biopolttoaineet. Biokaasun potentiaalisena ongelmana on kuitenkin metaanivuoto (Gilbert ym., 2018)

4.5.2 Polttoaineen kustannukset

Biopolttoaineiden kustannukset riippuvat niiden tuotantotavoista. Yleisesti ottaen kuitenkin biopolttoaineiden hinta on huomattavasti korkeampi kuin perinteisten polttoaineiden (DNV, 2025; Solakivi & Ojala, 2021). Rotterdamin satamassa myydyin biopolttoaine B30 (30 % polttoaineseoksesta biopolttoainetta) maksaa 60 % enemmän kuin erittäin vähärikkinen polttoöljy (VLSFO). Singaporessa suosituinta on B24, joka maksaa 30 % enemmän kuin VLSFO. Molemmissa polttoaineissa FAME biodieseliä on sekoitettu erittäin vähärikkiseen polttoöljyyn. Näiden kahden sataman myymä biopolttoainemäärä kattoi noin puolet kaikesta myydystä biopolttoaineesta merikuljetuksille vuonna 2023. (DNV, 2025) Merenkulun lainsäädännön kiristymisen ansiosta biopolttoaineiden kustannuskilpailukyky tulee paranemaan tulevaisuudessa (Solakivi & Ojala, 2021).

4.5.3 Käyttövalmius

Biopolttoaineet ovat käyttövalmiudeltaan hyvässä asemassa ja niitä käytetään jo meriliikenteessä. Biodiesel ja biokaasu on niin sanottuja drop-in polttoaineita, joita voidaan käyttää nykyisissä moottoreissa ja jakeluinfrastruktuurissa ilman, että niihin tarvitsee tehdä merkittäviä muutoksia. (Solakivi & Ojala, 2021) Biopolttoaineita on ollut saatavilla vuodesta 2015 lähtien 60 eri satamassa

ympäri maailmaa, keskittyen pääasiassa Eurooppaan ja Itä-Aasiaan. Biopolttoaineita jakelevien satamien määrän odotetaan kasvavan tulevaisuudessa. (DNV, 2025) Solakiven ja Ojalan (2021) mukaan laivojen moottorien vaatimustaso polttoaineille on alhaisempi kuin esimerkiksi lentoliikenteessä, joten niissä voidaan käyttää vähemmän jalostettuja ja viskositeetiltaan korkeampia polttoaineita. Tämä alentaa meriliikenteelle tarkoitettujen biopolttoaineiden hintaa verrattuna muihin sektoreihin.

5 Vaihtoehtoisten polttoaineiden SWOT-analyysi

Vaihtoehtoisia polttoaineita arvioidaan SWOT-analyysin (eng. strengths, weaknesses, opportunities, threats) avulla, jossa keskitytään niiden sisäisiin vahvuuksiin ja heikkouksiin sekä ulkoisiin mahdollisuuksiin ja uhkiin. SWOT-taulukon kohtia tutkitaan ensisijaisesti tutkielmassa aiemmin käsitellyistä kolmesta näkökulmasta, jotka ovat päästöt, polttoaineen kustannukset ja polttoaineen käyttövalmius. Taulukossa 5 SWOT-analyysi toteutetaan koko merikuljetusten kontekstissa, eikä siinä esimerkiksi keskitytä tietynlaisisiin alustyypppeihin.

Taulukko 5 Vaihtoehtoisten polttoaineiden SWOT-analyysi

	Vahvuudet	Heikkoudet	Mahdollisuudet	Haasteet
Ammoniakki	<p>Hiiletön polttoaine</p> <p>Voidaan käyttää nykyisissä moottoreissa ja polttokennoissa</p> <p>Toimii vedyn kuljettajana</p> <p>Vie vähemmän lastitilaa kuin vety</p> <p>Tuotantomenetelmät ovat olleet pitkään käytössä</p>	<p>Tuotantokapasiteetti ei riitä merikuljetusten käyttöön tällä hetkellä</p> <p>Tuotetaan fossiilisista energialähteistä tällä hetkellä</p> <p>Ei ole vielä laajamittaisesti merikuljetusten käytössä</p>	<p>Voidaan tuottaa päästöttömästi uusiutuvalla energialla</p> <p>Käyttöönotto kohtalaiset helppoa, sillä ammoniakkaa voidaan käyttää nykyisissä moottoreissa</p>	<p>Tuotantokapasiteettia tulee kasvattaa merkittävästi</p> <p>Polttoaineena ammoniakki on vasta testivaiheessa</p> <p>Turvallisuusongelmat liittyen mahdollisiin polttoaineluotoihin tulee ratkaista</p> <p>Jakeluinfrastruktuuria ei ole vielä olemassa</p>
Metanoli	<p>Käytön aikaiset hiilidioksidi-, rikki- typpi- ja pienhiukkaspäästöt ovat merkittävästi alhaisemmat kuin perinteisissä polttoaineissa</p> <p>Monia erilaisia tuotantotapoja</p> <p>Koostumuksensa vuoksi ei syrjäytä aluksien lastitilaa merkittävästi kuten esimerkiksi vety</p>	<p>Tuotetaan tällä hetkellä pääasiassa fossiilisesta energiasta</p> <p>Tuotetaan pääasiassa muihin tarkoituksiin kuin polttoaineeksi</p> <p>Heikko saatavuus satamissa</p>	<p>Voidaan tuottaa uusiutuvalla energialla</p> <p>Voidaan käyttää Drop in- polttoaineena</p> <p>Alhaisen hiilipitoisuuden takia houkutteleva vaihtoehto kireiden päästötavoitteiden saavuttamiseksi</p>	<p>Koko elinkaaren aikaisia päästöjä vähennettävä merkittävästi</p> <p>Maakaasusta tuotettuna metanolin päästöt voivat olla korkeammat kuin HFO:n</p> <p>Tuotantokapasiteettia tulisi kasvattaa merkittävästi merikuljetusten tarpeeseen</p>

<p>Vety</p>	<p>Kokonaan hiiletön polttoaine</p> <p>Voidaan tuottaa päästöttömästi vedestä elektrolyysillä</p>	<p>Vaikuttaa kaikista polttoaineista negatiivisimmin aluksen lastitilaan</p> <p>Vaatii erikoistunutta säilytysteknologiaa</p> <p>Kallein meripolttoaine</p> <p>Ei olemassa olevaa jakeluinfrakstruktuuria</p> <p>Heikko käytettävyys pitkän matkan kuljetuksissa</p>	<p>Teknologinen kehitys nopeaa</p> <p>Käytössä jo muilla kuljetusmuodoilla</p> <p>Uusiutuvan energian hinnanlasku tekee vesielektrolyysistä kannattavaa tulevaisuudessa</p>	<p>Hinnan tulee laskea, jotta käyttö yleistyisi</p> <p>Nykyinen tuotanto perustuu lähes täysin fossiiliseen energiaan</p> <p>Nykyinen tuotanto ei riitä merikuljetusten energiatarpeeseen</p>
<p>LNG</p>	<p>Käytössä jo merikuljetuksissa</p> <p>Alhaisemmat päästöt kuin konventionaalisilla polttoaineilla</p> <p>Kustannustehokas vaihtoehtoinen polttoaine</p>	<p>Fossiilinen polttoaine</p> <p>Vaatii erikoistunutta säilytysteknologiaa</p> <p>Metaanivuodon mahdollisuus</p>	<p>Jakeluinfrakstruktuuri kehittyä ja laajenee</p> <p>LNG-aluksia valmistetaan ja tilataan enenevässä määrin</p> <p>Metaanivuoto voidaan eliminoida kokonaan tulevaisuudessa</p> <p>Dual-fuel-käyttömahdollisuus</p>	<p>Fossiilisen maakaasun määrän väheneminen tulevaisuudessa</p> <p>Ei voida käyttää pitkälle tulevaisuuteen asti merikuljetusten hiilineutraaliustavoitteiden takia</p>
<p>Biopolttoaineet</p>	<p>Käytössä jo meripolttoaineena</p> <p>Voidaan käyttää nykyisissä polttomoottoreissa</p> <p>Päästövähennyspotentiaali on hyvä ja</p> <p>Ei vaadi uuden jakeluinfrakstruktuurin rakentamista</p>	<p>Uusiutuvan biomassan saatavuus on rajallista</p> <p>Hinta on korkeampi kuin konventionaalisilla polttoaineilla</p>	<p>Voivat olla täysin hiilineutraaleja</p> <p>Voidaan tuottaa muiden tuotteiden jätteistä</p> <p>Käyttöä voidaan laajentaa hyvän käyttövalmiuden takia</p>	<p>Kestävän biomassan tuotanto ei riitä kattamaan merikulun energiatarvetta tällä hetkellä</p> <p>Maankäyttöön liittyvät huolet</p> <p>Kilpailu tarjonnasta muiden kuljetusmuotojen kanssa</p>

Taulukossa 5 käsitellyistä vaihtoehtoisista polttoaineista on vaikea nostaa esiin kaikista näkökulmista yksinkertaisesti parasta polttoainetta, joka sopisi meriliikenteen kaikkiin skenaarioihin. SWOT-analyysin sekä tieteellisen kirjallisuuden perusteella LNG on tällä hetkellä paras siirtymävaiheen

polttoaine. Se on kustannustehokas, saatavuudeltaan parhain ja käytettävyydeltään hyvä polttoaine siirryttäessä vähäpäästöisempään tulevaisuuteen.

Biopolttoaineet ovat myös todennäköisiä tulevaisuuden polttoaineita. Uusiutuvan biomassan tuotannon kasvu mahdollistaisi hiilineutraalin polttoaineen tuotannon, joka täyttäisi IMO:n ja EU:n tulevaisuuden päästötavoitteet. Biopolttoaineet toimisivat niin siirtymävaiheessa kuin kokonaan hiilineutraaleissa merikuljetuksissa, jos niiden tuotantoa onnistutaan skaalaamaan kattamaan merikuljetusten energiatarpeen. IEA:n Energy Technology Perspectives (2024) raportissa arvioidaan, että etenkin lyhyellä aikavälillä biopolttoaineiden suosio tulee kasvamaan.

LNG:n ja biopolttoaineiden lisäksi ammoniakin ja vedyn nähdään olevan pitkällä aikavälillä mahdollisia vähäpäästöisiä polttoaineita merikuljetusten tarpeisiin (Tabibian & Sharifzadeh, 2023). Ammoniakin arvioidaan kustannustehokas vähäpäästöinen polttoaine suureen osaan aluksista tulevaisuudessa, vaikka se on hinnaltaan silti huomattavasti kalliimpaa kuin HFO. (IEA, 2024a) Ammoniakki toimii vedyn kuljettajana ja sen vaatima säilömisen tilatarve on pienempi kuin puhtaalla vedyllä, minkä vuoksi ammoniakki on potentiaalisempi vaihtoehtoinen polttoaine. Meriliikenteen siirtyminen ammoniakin käyttöön laajassa mittakaavassa vaatii kuitenkin merkittävää muutosta sen tuotantotapoihin, jotta polttoaineen elinkaaripäästöt saadaan pysymään alhaisina. Uusiutuvan energian tulevaisuuden kustannuskehitys vaikuttaa positiivisesti ammoniakin kustannustehokkaaseen tuotantoon ympäristöystävällisesti.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Tässä tutkielmassa vastattiin seuraaviin tutkimuskysymyksiin tieteelliseen kirjallisuuteen perustuen:

- Millaisia ympäristöhyötyjä vaihtoehtoisilla polttoaineilla voidaan saavuttaa merikuljetuksissa verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin
- Mitä haasteita ja mahdollisuuksia eri vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön liittyy?

Tutkielman rakenne koostui aiheeseen johdattelun lisäksi merikuljetusten päästöjen käsittelystä yleisellä tasolla, merikuljetusten päästöjen sääntelystä sekä perinteisten polttoaineiden ominaispiirteistä ja ympäristövaikutuksista. Neljännessä luvussa käsiteltiin perinteisiin polttoaineisiin vertailevasti vaihtoehtoisia polttoaineita kolmesta näkökulmasta, jotka olivat päästöt, polttoaineen kustannukset ja käyttöönotto. Luvussa syvennyttiin potentiaalisimpiin polttoainevaihtoehtoihin, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin Euroopan unionin ja Kansainvälisen merenkulkujärjestön asettamiin tulevaisuuden päästövaatimuksiin, ovat kustannuksiltaan suotuisia ja joiden käyttöönotto merikuljetuksiin on luontevaa. Käyttöönoton yhteydessä sivuttiin myös polttoaineiden jakeluinfrastruktuuria.

Viidennessä luvussa koottiin SWOT-taulukon jokaisen vaihtoehtoisen polttoaineen hyödyt, haitat, mahdollisuudet ja uhat. SWOT-taulukon ja neljännessä luvussa käytetyn tieteellisen kirjallisuuden perusteella esiin nousi kolme vaihtoehtoista polttoainetta, jotka voivat auttaa meriliikennettä saavuttamaan päästövaatimukset kustannustehokkaasti tulevaisuudessa. Ammoniakin nähdään olevan yksi parhaimmista kemialliselta koostumukseltaan täysin hiilettömistä polttoaineista. Ammoniakki on vielä testivaiheessa merikuljetuksissa, jolloin se ei voi vastata energiatarpeeseen lyhyellä aikavälillä. Nesteytetty maakaasu eli LNG nähdään lyhyellä aikavälillä hyvänä polttoaineena merikuljetuksiin päästöjen, kustannusten, käytettävyyden ja jakeluinfraktuurin näkökulmasta. Fossiilisenä polttoaineena se ei kuitenkaan ole paras vaihtoehto pitkällä aikavälillä. Biopolttoaineet ovat lyhyellä aikavälillä käytettävyyden ja päästöjen puolesta sovelias vaihtoehto merikuljetusten vähäpäästöiseksi polttoaineeksi. Ne voivat kattaa myös pitkällä aikavälillä osan merikuljetusten energiatarpeesta, jos tuotantoa skaalataan vastaamaan kasvavaan kysyntään.

Merikuljetusten vaihtoehtoisia polttoaineita käsittelevissä tieteellisissä tutkimuksissa on käsitelty polttoaineiden elinkaaripäästöjä ja käyttöönoton haasteita yksittäisten polttoaineiden kohdalla. Tieteellisessä kirjallisuudessa ilmenee tutkimusaukko siinä, ettei laajamittaista tutkimusta ole tehty merikuljetuksille absoluuttisesti parhaiten soveltuvasta hiilettömästä tai hyvin vähäpäästöisestä polttoaineesta. Laajamittainen selvitys parhaan polttoaineen löytämiseksi ohjaisi parhaassa

tapauksessa tutkimus- ja kehitysrahoitusta potentiaalisimpien polttoaineiden kehitykseen. Tämä auttaisi myös nopeammassa irtautumisessa konventionaalisista polttoaineista kohti vähäpäästöisiä merikuljetuksia.

Lähteet

- Aakko-Saksa, P. T., Lehtoranta, K., Kuittinen, N., Järvinen, A., Jalkanen, J.-P., Johnson, K., Jung, H., Ntziachristos, L., Gagné, S., Takahashi, C., Karjalainen, P., Rönkkö, T., & Timonen, H. (2023). Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines: Current trends and future options. *Progress in Energy and Combustion Science*, *94*, 101055. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>
- Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, *7*, 1962–1985. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.036>
- Alfa Laval. (2018). *Marine fuels in the low-sulphur era*. <https://www.alfalaval.us/industries/marine-and-transportation/marine/oil-treatment/fuel-line/marine-fuels-in-the-low-sulphur-era/>
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, *182*, 72–88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Bengtsson, S., Andersson, K., & Fridell, E. (2011). A comparative life cycle assessment of marine fuels: Liquefied natural gas and three other fossil fuels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, *225*(2), 97–110. <https://doi.org/10.1177/1475090211402136>
- Bengtsson, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2012). Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping. *Energy Policy*, *44*, 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.030>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(9), 4583–4596. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.110>

- Bicer, Y., Dincer, I., Vezina, G., & Raso, F. (2017). Impact Assessment and Environmental Evaluation of Various Ammonia Production Processes. *Environmental Management*, 59(5), 842–855. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0831-6>
- Bilgili, L. (2023). A systematic review on the acceptance of alternative marine fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 182, 113367. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113367>
- Breuer, M. E. G., & Twisk, D. D. (2025). Euroopan unionin yhdenmety meripolitiikka. *Euroopan parlamentti*.
- Brynolf, S. (2014). *Environmental assessment of present and future marine fuels*. Chalmers University of Technology.
- Brynolf, S., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Environmental assessment of marine fuels: Liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production*, 74, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>
- Chevron. (2007). *Everything You Need To Know About Marine Fuels*.
- Christodoulou, A., & Cullinane, K. (2022). Potential alternative fuel pathways for compliance with the ‘FuelEU Maritime Initiative’. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 112, 103492. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103492>
- Corbett, J. J., & Winebrake, J. J. (2008). Emissions Tradeoffs among Alternative Marine Fuels: Total Fuel Cycle Analysis of Residual Oil, Marine. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(4), 538–542. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.4.538>
- Deniz, C., & Zincir, B. (2016). Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, 113, 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089>
- D’Mello, G. (2025). *Steamship Mutual—IMO New Emissions Control Areas for Mediterranean Sea, Canadian Arctic and Norwegian Sea*. Haettu 28.3.2025, osoitteesta

<https://www.steamshipmutual.com/imo-new-emissions-control-areas-mediterranean-sea-canadian-arctic-and-norwegian-sea>

DNV. (2024). *Maritime forecast to 2025—A deep dive into shipping's decarbonization journey*. Det Norske Veritas.

DNV. (2025). *Maximizing the potential of biofuels in shipping*. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/maximizing-the-potential-of-biofuels-in-shipping/>

Dos Santos, V. A., Pereira Da Silva, P., & Serrano, L. M. V. (2022). The Maritime Sector and Its Problematic Decarbonization: A Systematic Review of the Contribution of Alternative Fuels. *Energies*, 15(10), 3571. <https://doi.org/10.3390/en15103571>

Euroopan komissio. (2021b). *"Fit for 55": Delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality*. Haettu 1.4.2025, osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>

Euroopan komissio. (2021c). *Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757*. Haettu 1.4.2025, osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021PC0551>

Euroopan komissio. (2021d). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC*. Haettu 5.4.2025, osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562>

Euroopan komissio. (2021a). *The European Green Deal*. Haettu 1.4.2025, osoitteesta https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

- Euroopan parlamentti & neuvosto. (2015). *Regulation (EU) 2015/757 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (Text with EEA relevance)*. Haettu 2.4.2025, osoitteesta <http://data.europa.eu/eli/reg/2015/757/oj/eng>
- Forbes. (2024). *Ammonia Is A Great Fertilizer But Would Be A Terrible Shipping Fuel*. Forbes. Haettu 19.4.2025, osoitteesta <https://www.forbes.com/sites/michaelbarnard/2024/01/03/ammonia-is-a-great-fertilizer-but-would-be-a-terrible-shipping-fuel/>
- Fortum. (2020). *Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin*. <https://www.fortum.com/fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>
- Fullonton, A., Lea-Langton, A. R., Madugu, F., & Larkin, A. (2025). Green ammonia adoption in shipping: Opportunities and challenges across the fuel supply chain. *Marine Policy*, *171*, 106444. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106444>
- Fun-sang Cepeda, M. A., Pereira, N. N., Kahn, S., & Caprace, J.-D. (2019). A review of the use of LNG versus HFO in maritime industry. *Marine Systems & Ocean Technology*, *14*(2–3), 75–84. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00059-y>
- Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesieme, U., Pazouki, K., & Murphy, A. (2018a). Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of Cleaner Production*, *172*, 855–866. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165>
- Gundersen Skåre, O., Longva, T., Sekkesæter, Ø., & Gill Hallesen, A. (2024). FuelEU Maritime—Requirements, compliance strategies and commercial impacts. *Det Norske Veritas DNV*.
- Gössling, S., Meyer-Habighorst, C., & Humpe, A. (2021). A global review of marine air pollution policies, their scope and effectiveness. *Ocean & Coastal Management*, *212*, 105824. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105824>

- 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*, *126*, 159–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>
- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *113*(D13), 2008JD009944. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- IEA. (2024a). Energy Technology Perspectives 2024. *International Energy Agency*.
- IEA. (2024b). *Global Hydrogen Review 2024*.
- IEEFA. (2024). *Global LNG Outlook 2024-2028*. Institute for Energy Economics and Financial Analysis. <https://ieefa.org/resources/global-lng-outlook-2024-2028>
- Ilmatieteen laitos. (2024). Lämmityspotentiaali. Teoksessa *Ilmakehä-ABC*. Haettu 16.4.2025, osoitteesta <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?term=L%C3%A4mmityspotentiaali>
- IMO. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*.
- Inal, O. B., Zincir, B., & Deniz, C. (2022). Investigation on the decarbonization of shipping: An approach to hydrogen and ammonia. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(45), 19888–19900. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.01.189>
- International Council on Clean Transportation. (2021). *Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies* [Briefing]. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Well-to-wake-co2-mar2021-2.pdf>
- Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship Energy Efficiency and Maritime Sector Initiatives to Reduce Carbon Emissions. *Energies*, *15*(21), 7910. <https://doi.org/10.3390/en15217910>
- Kanchiralla, F. M., Brynolf, S., Malmgren, E., Hansson, J., & Grahn, M. (2022). Life-Cycle Assessment and Costing of Fuels and Propulsion Systems in Future Fossil-Free Shipping.

Environmental Science & Technology, 56(17), 12517–12531.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03016>

Kontovas, C. A. (2020). Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation. *Marine Policy*, 113, 103815.

<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103815>

Law, L., Foscoli, B., Mastorakos, E., & Evans, S. (2021). A Comparison of Alternative Fuels for Shipping in Terms of Lifecycle Energy and Cost. *Energies*, 14(24), 8502.

<https://doi.org/10.3390/en14248502>

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2022). *Meriliikenteen vaihtoehtoiset käyttövoimat: Selvitys vaihtoehtoisten käyttövoimien ja polttoaineiden jakeluinfraktuurin kehittämistarpeista satamissa.*

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2022). *Meriliikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden markkinoiden kehitys ja vaikutukset Suomeen suuntautuvan meriliikenteen kustannuksiin.*

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2023). *IMO:ssa kiristettiin tavoitteita kansainvälisen meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi.* Traficom. Haettu 20.3.2025, osoitteesta <https://valtioneuvosto.fi/-/1410829/imo-ssa-kiristettiin-tavoitteita-kansainvalisen-meriliikenteen-kasvihuonekaasupaastojen-vahentamiseksi>

Liikenne- ja viestintäministeriö. (2025). Merenkulun päästökauppa ETS | Traficom. *Traficom*. Haettu 1.4.2025, osoitteesta <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/merenkulku/merenkulun-paastokauppa/merenkulun-paastokauppa-ets>

Lloyd's List. (2025). *Number of ships using LNG up 33% in 2024.*

<https://www.lloydslist.com/LL1152328/Number-of-ships-using-LNG-up-33-in-2024>

McKinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282–28297. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.066>

- Methanex. (2024). *How Methanol is Produced*. <https://www.methanex.com/about-methanol/how-methanol-is-produced/>
- Methanex. (2025). *Methanol regional contract pricing*. <https://www.methanex.com/about-methanol/pricing/>
- Nair, A. (2016). *Alternative Fuels for Shipping: Potential for reductions in CO2 emissions, Financial viability for ship owners and, Optimised fleet mix design for policymakers*. Erasmus University Rotterdam.
- Oiltanking. (ei pvm.). Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO). *Glossary*. Haettu 12.4.2025, osoitteesta <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html>
- Pomaska, L., & Acciaro, M. (2022). Bridging the Maritime-Hydrogen Cost-Gap: Real options analysis of policy alternatives. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 107, 103283. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103283>
- Pöntynen, R., & Lempiäinen, P. (2015). Rikkisääntely ja uudet polttoaineet. *Turun yliopiston Brahea-keskus*.
- Ramsay, W., Fridell, E., & Michan, M. (2023). Maritime Energy Transition: Future Fuels and Future Emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 22(4), 681–692. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00369-z>
- Richter, A., Eyring, V., Burrows, J. P., Bovensmann, H., Lauer, A., Sierk, B., & Crutzen, P. J. (2004). Satellite measurements of NO₂ from international shipping emissions. *Geophysical Research Letters*, 31(23), 2004GL020822. <https://doi.org/10.1029/2004GL020822>
- Righi, M., Klinger, C., Eyring, V., Hendricks, J., Lauer, A., & Petzold, A. (2011). Climate Impact of Biofuels in Shipping: Global Model Studies of the Aerosol Indirect Effect. *Environmental Science & Technology*, 45(8), 3519–3525. <https://doi.org/10.1021/es1036157>

- Schreuder, W., Slootweg, J. C., & Van Der Zwaan, B. (2025). Techno-economic assessment of low-carbon ammonia as fuel for the maritime sector. *Applications in Energy and Combustion Science*, 22, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2025.100330>
- Ship & Bunker. (2025a). *A Comparative Analysis of Alternative Fuels for Sustainable Maritime Shipping*. <https://shipandbunker.com/news/world/527976-insight-a-comparative-analysis-of-alternative-fuels-for-sustainable-maritime-shipping>
- Ship & Bunker. (2025b). *Global Average Bunker Price Bunker Prices*. <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-glb-global-average-bunker-price>
- Solakivi, T., & Ojala, L. (2021). *Laivaliikenteen vähähiiliset polttoaineet ja niiden tuleva kehitys*.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Alley, R. B. B., Berntsen, T., Bindoff, N. L. L., Chen, Z., Chidthaisong, A., Gregory, J. M. M., Hegerl, G. C. C., Heimann, M., Hewitson, B., Hoskins, B. J. J., Joos, F., Jouzel, J., Kattsov, V., Lohmann, U., Matsuno, T., Molina, M., ... Wratt, D. (2007). Technical Summary, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis—Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Tabibian, S. S., & Sharifzadeh, M. (2023). Statistical and analytical investigation of methanol applications, production technologies, value-chain and economy with a special focus on renewable methanol. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 179, 113281. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113281>
- Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2023). Review of the IMO Initiatives for Ship Energy Efficiency and Their Implications. *Journal of Marine Science and Application*, 22(4), 662–680. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00374-2>
- Tran, N. K., & Haasis, H.-D. (2015). An empirical study of fleet expansion and growth of ship size in container liner shipping. *International Journal of Production Economics*, 159, 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.09.016>

- Traut, M., Larkin, A., Anderson, K., McGlade, C., Sharmina, M., & Smith, T. (2018). CO₂ abatement goals for international shipping. *Climate Policy*, 18(8), 1066–1075.
<https://doi.org/10.1080/14693062.2018.1461059>
- UNCTAD. (2024). Review of maritime transport 2024: Navigating maritime chokepoints.
- Wärtsilä. (ei pvm.). *Dual-fuel engines from Wärtsilä*. Haettu 24.4.2025, osoitteesta
<https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/dual-fuel-engines-from-wartsila>
- Wärtsilä. (2023). *Ammonia as marine fuel? It is easier if you do it smart*. Haettu 17.4.2025, osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/ammonia-fuel-for-thought-in-our-deep-dive>
- Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126651.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>
- Zisi, V., Psaraftis, H. N., & Zis, T. (2021). The impact of the 2020 global sulfur cap on maritime CO₂ emissions. *Maritime Business Review*, 6(4), 339–357. <https://doi.org/10.1108/MABR-12-2020-0069>
- Øberg, M. M. (2013). Life Cycle Assessment of Fuel Choices for Marine Vessels. *NTNU*.