



# Työkaluja meriliikenteen polttoaineratkaisujen arviointiin

Ville Henttu (toim.)



Ville Henttu (toim.)

# Työkaluja meriliikenteen poltto- aineratkaisujen arviointiin



Euroopan unionin  
osarahoittama

**XAMK TUTKII 32**

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU  
KOTKA 2024



---

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kannen kuva: Elias Altarriba

Taitto: Grano Oy

ISBN 978-952-344-586-4 (PDF)

ISSN 2489-4575 (verkko)

[julkaisut@xamk.fi](mailto:julkaisut@xamk.fi)

# TIIVISTELMÄ

Merenkulun käyttövoimat ovat perustuneet vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin. Globaalisti tarkasteltuna kauppamerenkulussa raskas polttoöljy on ollut vuosikymmeniä käytetyin polttoaine, joskin tiukentuneiden ympäristömääräysten seurauksena myös tislepolttoaineet (MDO/MGO) tai nesteytetty maakaasu (LNG) ovat yleistyneet. Uudet säädökset pakottavat kuitenkin muutokseen. Euroopan unionin FuelEU Maritime -asetus edellyttää, että meriliikenteen polttoaineiden hiili-intensiteettiä lasketaan säädöksen vaatimalla tavalla. Päästökauppa asettaa tuotetulle hiilidioksiditonille hinnan. Lisäksi Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on asettanut tavoitteeksi meriliikenteen hiilineutraalisuuden tulevien vuosikymmenien aikana.

Teknisiä ratkaisuvaihtoehtoja fossiilisten polttoaineiden vähentämiselle löytyy useita. Eri-tyyppiset biopolttoaineet ovat suhteellisen helposti käyttöön otettavissa nykyisillä aluksilla. Biokaasu on näistä helpoin, sillä koostumukseltaan se on pääasiassa metaania fossiilisen maakaasun tavoin. Metanolimoottorit ovat tulleet monien moottorinvalmistajien tuotevalikoimaan. Synteettisillä polttoaineilla (e-polttoaineilla) tarkoitetaan tuotteita, jotka on valmistettu kemiallisesti vedystä ja hiilidioksidista. Näihin vaihtoehtoihin on asetettu paljon odotuksia, mutta tuotanto vaatii huomattavasti energiaa. Ammoniakki hiilivaapa vaihtoehtona voi myös olla yksi tulevaisuuden käyttövoima, ja parhaillaan moni moottorinvalmistaja panostaakin paljon ammoniakkimoottoreiden tuotekehitykseen. Lisäksi kohtuuhintaisten pienydinreaktoreiden mahdollinen yleistyminen tulevaisuudessa voi muodostaa yhden käyttövoimavaihtoehdon myös meriliikenteelle.

Haasteita kuitenkin toimialalla riittää. Vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotantomäärät ovat vähäisiä oletettuun kysyntään nähden. Tämä merkitsee, että investointeja on tehtävä merkittävästi ja riittämätön tarjonta asetettuihin käyttövelvoitteisiin nähden voi aiheuttaa voimakasta turbulenssia polttoaineiden hintatasoon. Esitetyillä vaihtoehdoilla on omat vahvuutensa, mutta myös heikkoutensa, mikä tekee investointipäätöksistä poikkeuksellisen kompleksisia. Asiaa hankaloittaa vielä välttämättömyys tarkastella polttoaineen elinkaaren kokonaispäästöjä, jotka monissa esitetyissä vaihtoehdoissa voivat ratkaista sen, onko kyseinen vaihtoehto lopulta kestävä vai ei. Tämän arviointityön helpottamiseksi MERPOL-hankkeessa (*Uusiutuvat polttoaineet – tukea meriliikenteen kestävään ja hiilineutraaliin kasvuun*) on kehitetty kaksi mallia, joiden avulla voidaan saada näkökulmia eri vaihtoehtojen ominaispiirteisiin ja kestävyys. Elinkaarianalyysimalli on päivitetty versio aiemmassa MEPTEK-hankkeessa (*Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu*) kehitetystä mallista. Sen avulla on mahdollista vertailla kahden metanolipolttoaineen ja biokaasun elinkaarenaikaista ympäristökestävyyttä eri teknisissä ja operatiivis-

sa kombinaatioissa. Kokonaiskustannusmallin avulla puolestaan tarkastellaan valittujen vaihtoehtojen kustannuksia huomioiden pääomakulut, polttoainekulut, päästömaksut ja muut operatiiviset kulut, ja verrataan saatuja tuloksia FuelEU Maritimen asettamiin reunaehtoihin. Näiden avulla on mahdollista laajentaa kokonaiskäsitystä eri vaihtoehtojen ominaispiirteistä ja arvioida niitä eri lähtöarvojen avulla.

**Asiasanat:** merenkulku, uusiutuvat polttoaineet, FuelEU Maritime, elinkaarianalyysi, kokonaiskustannusanalyysi

# ABSTRACT

For decades, marine propulsion has relied strongly on fossil fuels. Globally, heavy fuel oil has been the predominant fuel used for merchant shipping. However, the introduction of more stringent environmental regulations has increased the market share of distillate fuels (MDO/MGO) and liquefied natural gas (LNG). The proliferation of new environmental regulations is necessitating a transformation. Per the stipulations outlined in the regulatory framework, the FuelEU Maritime Regulation mandates the gradual decrease of the carbon intensity of marine fuels. Emissions trading establishes a price on the tons of carbon dioxide produced, and the International Maritime Organization (IMO) has established a goal to achieve carbon neutrality in maritime transport over the coming decades.

Several available options could be employed to reduce the consumption of fossil fuels. The incorporation of designated biofuels into existing maritime vessels is a relatively straightforward process. Biogas is the most straightforward to implement as its composition is primarily methane, similar to natural gas. Methanol engines have been incorporated into the product catalogues of numerous engine manufacturers. Synthetic fuels, or e-fuels, are produced from hydrogen and carbon dioxide through chemical processes. These alternatives have garnered significant interest, but their production necessitates substantial energy input. Ammonia, a carbon-free option, may also emerge as a prominent fuel source in the future, and numerous engine manufacturers are investing heavily in ammonia engine development.

Furthermore, the potential proliferation of cost-effective small nuclear reactors may also offer a future propulsion alternative for maritime transportation. Nevertheless, numerous challenges remain to be addressed. The production volumes of alternative fuels are insufficient to meet the anticipated demand, indicating that substantial investments will be necessary. An inadequate supply to fulfil usage obligations can result in significant fluctuations in fuel prices. The options presented have both advantages and disadvantages, making investment decisions particularly challenging.

Furthermore, the total life-cycle emissions of the fuel must be considered, as this can be a significant factor in determining the sustainability of an option. Two models have been developed as part of the MERPOL (Renewable fuels – Support for the sustainable and carbon-neutral growth of maritime transport) project to facilitate this assessment, providing insights into the characteristics and sustainability of the different fuel options. The life cycle analysis model is an updated iteration of a model developed in the preceding MEPTek (Benchmarking study of marine emission reduction technologies) project.

The upgraded model permits a comparison of the life-cycle environmental sustainability of two methanol fuels and biogas in disparate technical and operational combinations. The total cost of ownership model is employed to evaluate the financial implications of the selected options, encompassing capital costs, fuel costs, emission charges, and other operational expenses. This analysis is conducted in alignment with the constraints set forth by the FuelEU Maritime Regulation, thereby facilitating a comprehensive understanding of the characteristics of the various options and enabling their assessment against diverse baseline values.

**Keywords:** seafaring, renewable fuels, FuelEU Maritime, life cycle analysis, total cost of ownership analysis

# ESIPUHE

Meriliikenteen pääasiallisen käyttövoiman vaihtuminen fossiilisista polttoaineista ei-fossiiliin on EU:ssa säädetty asetuksella. IMO:ssa on säädösten valmistelussa asetettu samankaltaisia tavoitteita. Tämä merkitsee, että muutokseen veloitetaan – sitä ei enää vain toivota tai odoteta. Monenlaisia teknisiä ratkaisujakin on olemassa markkinoilla, mutta selkeää ja kiistatonta ”voittajaratkaisua” ei toistaiseksi ole löydetty. Seuraavan vuosikymmenen aikana todennäköisesti hahmottuu, mihin suuntaan merenkulun käyttövoimaratkaisut käytännössä tulevat kehittymään. Tietoa tarvitaan kuitenkin paljon lisää kokonaisuuksien ja kerrannaisvaikutusten ymmärtämiseksi. Tässä hankkeessa on kehitetty kaksi mallia, joiden avulla on mahdollista arvioida eri vaihtoehtojen kestävyyttä eri näkökulmista tarkasteltuna. Tarkoitus on, että nämä mallit osaltaan edesauttavat oikeiden ratkaisujen löytymistä.

Hanketiimimme kiittää kaikkia hankkeen yhteistyökumppaneita, rahoittajia ja muita tahoja, jotka ovat edesauttaneet tämän hankkeen toteutumista. Asia on tärkeä, ajankohtainen ja valitettavasti vaatii vielä paljon kehitystyötä ja investointeja ennen kuin meriliikenteen tavoiteltu hiilineutraalisuus saavutetaan.

*Ville Henttu*, tutkimusjohtaja

Kotkassa 1.12.2024

# KIITOKSET

Hankkeemme työntekijät (Elias Altarriba ja Taru Tanhuanpää) kiittävät Kymenlaakson liittoa, joka vastaavana viranomaisena hyväksyi hankkeemme rahoitettavaksi Euroopan aluekehitysrahastosta. Kiitokset Gasum Oyj:lle hankeyhteistyöstä niin hankkeen ideointi- kuin työstövaiheessakin sekä osallistumisesta hankkeen rahoitukseen. Kiitokset Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululle hankkeen omarahoitusosuuden kattamisesta. Kiitokset ohjausryhmäläisille (Annukka Lehikoinen, Meriturvallisuuden ja -liikenteen tutkimuskeskus Merikotka; Olli Nevalainen, Gasum Oyj; Mats Björkendahl, Suomen Varustamot ry; Johanna Luoma, Finnlines Oyj; Anssi Lehto, MeriAura Oy; Heikki Korpi, Wärtsilä Oyj; Satu Kuurma; Liikenne- ja viestintävirasto Traficom; Sari Kuusisto, Neste Oyj; Sirpa Rahiala, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu; Anna-Riikka Karhunen, Kymenlaakson liitto) asiantuntevasta yhteistyöstä hankkeen tavoitteiden saavuttamiseksi.

*Elias Altarriba & Taru Tanhuanpää*

# TEKIJÄT

## **ELIAS ALTARRIBA,**

TkL, projektipäällikkö

Logistiikka ja merenkulku, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

## **TARU TANHUANPÄÄ,**

MMM, TKI-asiantuntija

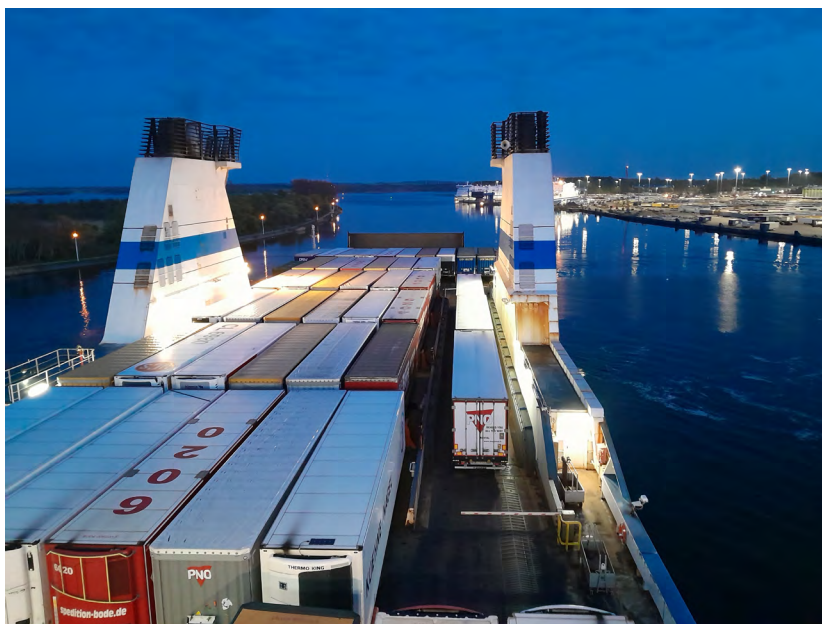
Logistiikka ja merenkulku, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ.....	5
ABSTRACT.....	7
ESIPUHE .....	9
KIITOKSET .....	10
TEKIJÄT.....	11
MERILIIKENTEEN NYKYISET KÄYTTÖVOIMAT JA TARVE MUUTOKSELLE.....	13
Elias Altarriba.....	13
KATSAUS MERENKULUN VAIHTOEHTOISIIN POLTTOAINEISIIN .....	20
Taru Tanhuanpää.....	20
MERENKULUN VAIHTOEHTOISTEN POLTTOAINEIDEN VALMISTUSPROSESSIT .....	46
Taru Tanhuanpää.....	46
MERENKULUN VAIHTOEHTOISTEN POLTTOAINEIDEN HINTOJEN KEHITYS .....	66
Taru Tanhuanpää.....	66
VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET ALUEKEHITYKSEN NÄKÖKULMASTA .....	98
Elias Altarriba & Taru Tanhuanpää.....	98
METANOLIN JA BIOKAASUN YMPÄRISTÖKESTÄVYYDEN ANALYSOINTITYÖKALU .....	106
Elias Altarriba.....	106
POLTTOAINEVAIHTOEHTOJEN TCO-TYÖKALU .....	128
Elias Altarriba.....	128
METANOLIN JA BIOKAASUN KESTÄVYYSIINDEKSIANALYYSI – REFERAATTI CSUM24-KONFERENSSIPAPERISTA .....	141
Taru Tanhuanpää.....	141
RIKKIPÄÄSTÖJEN YMPÄRISTÖINDEKSIMENETELMÄANALYYSI – REFERAATTI MARTECH24-KONFERENSSIPAPERISTA.....	150
Taru Tanhuanpää.....	150
POHDINTAA KÄYTTÖVOIMAVAIHTOEHTOJEN TULEVAISUUDENNÄKYMISTÄ.....	159
LISÄLUKEMISTA.....	168

# MERILIIKENTEEN NYKYISET KÄYTTÖVOIMAT JA TARVE MUUTOKSELLE

Elias Altarriba



Merenkulussa käytettävät polttoaineet ovat perustuneet vahvasti fossiilisiin raaka-aineisiin. Kauppamerenkulussa raskaan polttoöljyn eri jalosteet ovat muodostuneet vuosikymmenien kuluessa käytännössä standardiksi. Pääsy tähän kehitykseen on ollut polttoaineen edullisuus. Raskaan polttoöljyn kysyntä maailmanmarkkinoilla on ollut vähäistä verrattuna esimerkiksi tieliikenteessä käytettäviin tislepolttoaineisiin, mutta öljynjalostamoilla raskaita polttoainejakeita tullaan tuottaneeksi joka tapauksessa osana jalostusprosessia. Kauppamerenkulun alusten tyypillisessä kokoluokassa raskaan polttoöljyn vaatimat esikäsitelyjärjestelmät ja moottoriratkaisut eivät myöskään ole tuottaneet ylitsepääsemättömiä tila- tai paino-ongelmia, jolloin teknisiä esteitä raskaan polttoöljyn käytön yleistymiselle ei ole syntynyt. (Woodyard & Latarche 2009, luku 9.)

Alusten tuottamien ilmapäästöjen rajoitukset ovat astuneet voimaan myöhään verrattuna teollisuuteen tai maantieliikenteeseen. Vuon-

na 2006 voimaan astunut MARPOL-yleissopimuksen liite VI (IMO s.a.) määrittä meriliikenteen polttoaineen enimmäisrikkipitoisuudeksi 4,5 prosenttia. Typen oksidien päästöjen rajoittamiseksi määriteltiin TIER-luokat (IMO 2013, Annex 1 & 2). Sitten rajoitukset ovat tiukentuneet huomattavasti sekä globaalisti että alueellisesti. Osa säädöksistä on laadittu Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) toimesta, jolloin niiden voimassaolo koskee kaikkia merialueita, ellei säädöksessä toisin ole määritetty. Myös Euroopan unioni on laatinut lukuisia merenkulun päästöjä rajoittavia säädöksiä. MRV-asetuksen tavoitteena oli luoda raportointijärjestelmä alusten vuotuisille hiilidioksidipäästöille (EU 2015/757). Päästökauppajärjestelmän (EU ETS) laajentuminen merenkulkusektorille asettaa fossiilisille hiilidioksidipäästöille euromääräisen hinnan, mikä tekee hiilidioksidipäästöjen tuottamisesta kalliimpaa ja tukee siirtymistä vähäpäästöisempiin ratkaisuihin (EU 2023/959). Päästökauppajärjestelmän laajenemisen merenkulkusektorille mahdollisti osaltaan aiemmin luotu hiilidioksidipäästöjen raportointijärjestelmä. FuelEU Maritime -säädos edellyttää, että merenkulun polttoaineiden hiili-intensiteettiä on alennettava asteittain vuoteen 2050 asti (EU 2023/1805). Tämä säädos on luonteeltaan erityyppinen: siinä missä ETS painottaa ylimääräisiä, veroluonteisia maksuja hiilidioksidipäästöille, FuelEU Maritime vaatii irtautumista nimenomaan fossiilisiin ratkaisuihin perustuvista polttoaineista. Molemmat säädökset ovat kuitenkin niin sanotusti teknologiavapaita – niissä ei määritellä erikseen kiellettyjä tai sallittuja polttoaineratkaisuja tai moottorityyppisiä. Taulukossa 1 on listattu oleelliset kansainväliset sopimukset ja niiden voimaantulovuodet, mitkä rajoittavat Itämerellä ope-roivien alusten päästöjä.

**Taulukko 1.** Itämeren aluetta koskevien säädösten voimaantulo

Säädös	Säätäjä	Kuvaus	Vuosi
FuelEU Maritime	EU	Polttoaineen KHK-intensiteetin rajoitus	2025
EU ETS	EU	Päästökauppajärjestelmä	2024
CII	IMO	Aluskohtainen hiili-intensiteetti	2023
EEXI	IMO	Olemassa olevien alusten keskeytyysindeksi	2023
SEEMP III	IMO	Alusten ylläpidon ympäristömääräys	2023
NECA TIER III	IMO	Itämeri typen oksidien päästörajoitusalueeksi	2021
Sulfur limit	IMO	Globaali rikkirajoitus	2020
DCS SEEMP II	IMO	Kulutuksen ja CO <sub>2</sub> -päästöjen raportointi	2019
MRV	EU	Kulutuksen ja CO <sub>2</sub> -päästöjen raportointi	2018
SECA (0.1 %)	IMO	Itämeri rikkipäästörajoitusalueeksi	2015
SEEMP I	IMO	Alusten ylläpidon ympäristömääräys	2013
EEDI	IMO	Uusien alusten suunnitteluindeksi	2013
MARPOL Ax. VI	IMO	Ilmapäästöjen rajoitussopimus	2006

Lainsäädäntöön perustuvia veloitteita vähentää merenkulun päästöjä on siis laadittu runsaasti. Lisäksi on syytä huomioida, että myös muiden liikennemuotojen, kuten maantie- ja lentoliikenteen toimijoiden veloitteet päästöjen vähentämiseksi ovat kasvaneet. Eri toimialoja koskevat ratkaisumahdollisuudet kuitenkin poikkeavat huomattavasti. Rautatieliikenteessä sähköistäminen on vanha ja hyväksi havaittu keino siirtää tuotetut ilmapäästöt vetureista voimantuotantoon. Lentoliikenteessä tilanne on monimutkaisempi, sillä lentoliikenne on vahvasti kansainvälinen liikennemuoto, jossa henkilökuljetusvolyymit kasvavat jatkuvasti ja tehoa tarvitaan paljon. Lentokoneet ovat hyvin tila- ja painokriittinen kokonaisuus, ja käytettävien ratkaisujen on oltava ehdottoman luotettavia. Maantieliikenteessä sähköistämisen odotetaan helpottavan päästövähennystavoitteiden saavuttamista huomattavasti; tosin toimialan erityispiirteisiin kuuluu alan toimijoiden vahva desentralisaatio, joka vaikuttaa vahvasti monien uudistusten etenemiseen. Meriliikenteen erityispiirteisiin kuuluvat kansainvälisyys, operointi kansallisilla ja kansainvälisillä merialueilla, alusten

pitkät elinkaaret, suuri absoluuttinen tehontarve ja vaatimus polttoaineen kuljettamisesta mukana aluksella pitkiäkin matkoja.

Eri ratkaisujen ympäristövaikutukset vaihtelevat, ja eri aikoina painotetaan erityyppisiä asioita. Ensimmäiset merenkulun ilmapäästörajoitukset koskivat rikki- ja typen oksidien päästöjä (IMO s.a.; IMO 2013). Myrkkypäästöinä nämä komponentit pilasivat ympäristöä muun muassa aiheuttamalla happosateita. Ympäristömyrkyinä nämä tuottivat monenlaisia terveyshaittoja niin ihmisille kuin eliöstöllekin. Tällä hetkellä ilmastonmuutos on selkeästi suurin huolenaihe, mikä näkyy uusien säädösten painottumisessa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Käytännössä rajoitettavina kasvihuonekaasupäästöinä ovat nykyisissä säädöksissä hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O) (EU 2023/1805). Mustan hiilen (BC) päästöjä ei toistaiseksi rajoiteta, mutta sen mahdollisista vaikutuksista ilmaston lämpenemiseen erityisesti arktisilla alueilla julkaistaan jatkuvasti uutta tutkimusta. Alusten tuottamia hiukkaspäästöjä ei myöskään toistaiseksi rajoiteta.

Kokonaisvaikutusten arviointi on kuitenkin oleellista, jotta tehdyt ratkaisut olisivat aidosti kestäviä (Aakko-Saksa ym. 2023, 1–26; Bengtsson ym. 2011, 37–44; Bengtsson ym. 2014, 44–54). Muussa tapauksessa joudutaan usein tilanteeseen, jossa valitulla ratkaisulla saavutetaan määrätyt edut, mutta samalla saadaan aikaan odottamattomia uusia ongelmia. Tämä pätee niin ympäristöasioihin kuin valintojen taloudelliseenkin aspektiin. Mikäli valittu ratkaisu osoittautuu taloudellisesti kestävämmäksi, se yleensä karsiutuu markkinoilta ilman merkittäviä julkisen sektorin tukitoimia. Lisäksi varsin usein on jouduttu toteamaan, että tukitoimillakin voidaan lähinnä pitkittää karsiutumista.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toteuttama ja suurimmilta osin Euroopan aluekehitysrahaston rahoittama tutkimushanke *MERPOL: Uusiutuvat polttoaineet – tukea meriliikenteen kestävään ja hiilineutraaliin kasvuun* on toteutettu 1.5.2023–31.12.2024. Hankkeen yleistavoitteena on perehtyä uusiin polttoaineratkaisuihin sekä uusiin säädöksiin ja luoda kokonaiskäsitys nyt tapahtumassa olevasta muutoksesta. Konkreettisina tuotoksina hankkeessa tuotetaan kaksi mallinnustyökalua, LCA- ja TCO-mallit.

LCA-malli on aiemmassa *MEPTEK: Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu* -hankkeessa (toteutettu 1.5.2020–31.12.2022) kehitetty Excel-ympäristössä toimiva elinkaarianalyysityökalu (Rahiala 2022a, 172–199; Rahiala 2022b, 221–248), joka päivitetään toimimaan uusilla

polttoaineratkaisuilla. Tarkasteltaviksi polttoainevaihtoehdoiksi on valittu maakaasusta ja biomassasta tuotetut metanolit sekä biokaasu. Aiemmassa versiossa vertailukohteina olivat raskas polttoöljy HFO, kevyt polttoöljy MGO ja fossiilinen maakaasu LNG. Det Norske Veritasin (DNV) laatimien tilastojen (DNV 2020 10–24; DNV 2021, 30–32; DNV 2022, 10–11; DNV 2023, 24–25; DNV 2024, 19–24) perusteella kaasukäyttöisten alusten suhteellinen määrä on kasvanut huomattavasti 2010- ja erityisesti 2020-luvulla (ollen tosin tästä kasvusta huolimatta edelleen varsin harvinainen polttoaine kokonaiskuvassa). Siksi työkalujen versioilla on mahdollista tarkastella kaasualusten elinkaarenaikaisia kokonaispäästöjä ja vertailla niin fossiilisesta kuin biologisestakin lähteestä peräisin olevan metaanin ympäristökestävyyttä. DNV:n tilastoista on havaittavissa myös metanolilla toimivien alusten orastava kasvu globaaleissa tilauskirjoissa (DNV 2023, 24–25; DNV 2024, 19–24). Metanoli on yksi vaihtoehto korvaamaan fossiiliset öljypolttoaineet. Tosin metanolin tuotantotapa ratkaisee hyvin vahvasti tämän vaihtoehdon kokonaisympäristövaikutukset.

LCA-mallissa huomioidaan sekä polttoaineen käytön että sen valmistuksen aikaiset päästöt. Mallissa on mahdollista valita alukseen erilaisia päästövähennystekniikoita. Operointiprofiili määritellään vuositasolla käyttötunteina satamissa, manoveerauksessa ja operoinnissa merellä. Polttoaineen kulutus, polttoaineiden hinnat sekä eri kombinaatioiden pääoma- (CapEx) ja operointikustannukset (OpEx) ovat myös käyttäjän valittavissa. Tulokset esitellään kestävyysindeksin (Iannaccone ym. 2020, 1–13) avulla, joka koostuu ympäristöindeksistä ja taloudellisesta indeksistä. Indeksien keskinäiset painotukset ovat käyttäjän valittavissa. Ympäristöindeksi koostuu neljästä potentiaalista (ilmaston lämpenemis-, happamoitumis-, rehevöitymis- ja terveysvaikutuspotentiaalit), joiden painotuksia on mahdollista muuttaa. Valittu menetelmä tarjoaa mallin käyttäjälle mahdollisuuden vertailla eri kombinaatioiden kokonaisvaikutuksia laajasti perustuen numeroarvoiseen indeksiin.

TCO-mallissa katsantokanta on vahvasti taloudellinen. Mallin käyttäjä voi valita aluksilleen lähtöarvot, joiden perusteella malli määrittää muodostuneet kokonaiskustannukset sekä alus- että laivastokohtaisesti. Mallissa huomioidaan siihen syötettyjen polttoainevaihtoehtojen hinnat kokonaiskulutuksen perusteella, ETS-maksut, eri ratkaisujen pääoma- ja huoltokustannukset sekä valitun kombinaation yhteensopivuus FuelEU Maritime -säädöksen kanssa (mukaan lukien mahdolliset sakkomaksut). Työkalu tarjoaa erityisesti varustamoille tai muille alan toimijoille menetelmän arvioida oman laivastonsa kokonaiskustannuksia polttoainekustannusten näkökulmasta.

# 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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>.

Bengtsson, S.K., Andersson, K.E. & Fridell, E. 2011. Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Bengtsson, S.K., Fridell, E. & Andersson, K.E. 2014. Fuels for short sea shipping: a comparative assessment with focus on environmental impact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of engineering for the maritime environment* 1, 44–54. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/1475090213480349>.

DNV. 2020. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2020. Hamburg: DNV AS.

DNV. 2021. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2021. Hamburg: DNV AS.

DNV. 2022. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2022. Hamburg: DNV AS.

DNV. 2023. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2023. Hamburg: DNV AS.

DNV. 2024. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2024. Hamburg: DNV AS.

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2015/757.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/959.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2023/1805.*

*Iannaccone, T., Landucci, G., Tugnoli, A., Salzano, E. & Cozzani, V. 2020.* Sustainability of cruise ship fuel systems: comparison among LNG and diesel technologies. *Journal of cleaner production* 260, 121069. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121069>.

*International maritime organization IMO. 2013.* Air pollution and energy efficiency. Final report of the correspondence group on assessment of technological developments to implement the Tier III Nox emission standards under MARPOL Annex VI. London: International maritime organization.

*IMO s.a.* International convention for the prevention of pollution from ships (MARPOL). WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx) [viitattu 19.9.2024].

*Rahiala, S. 2022a.* Päästövähennysmenetelmien elinkaari- ja ympäristökustannusanalyysi. Teoksessa Altarriba (toim.) Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. Kotka: Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu.

*Rahiala S. 2022b.* Päästövähennysmenetelmien taloudellisen ja ympäristösuorituskyvyn vertailu. Teoksessa Altarriba (toim.) Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. Kotka: Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu.

*Woodyard, D. & Latarche, M. 2009.* Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Oxford: Elsevier science & technology.

# KATSAUS MERENKULUN VAIHTOEHTOISIIN POLTTOAINEISIIN

Taru Tanhuanpää

© Elias Altarriba



Vihreän siirtymän myötä merenkulussa on korvattava fossiiliset polttoaineet vähäpäästöisemmällä energiamuodoilla. Vähäpäästöisiä polttoaineratkaisuja ovat erilaiset biopolttoaineet ja synteettiset polttoaineet, kuten ammoniakki, e-metanoli ja synteettinen metaani. Fossiililla polttoaineilla on päästöistään huolimatta monia suotuisia ominaisuuksia, kuten korkea energiatiheys, soveltuvuus nykyisiin merimoottoreihin sekä hyvä saatavuus ja suhteellisen edullinen hinta. Siksi niiden korvaajaa onkin haastava löytää. Kaikilla edellä mainituilla vähäpäästöisillä polttoaineilla on sekä suotuisia että epäsuotuisia ominaisuuksia. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan muun muassa merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden päästöjä, fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia sekä soveltuvuutta nykyisiin laivamoottoreihin.

## Vaihtoehtoisten polttoaineiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet

Taulukossa 1 on esitetty merenkulun eri polttoainetyyppien fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat niiden soveltuvuuteen laivaliikenteen polttoaineiksi. Taulukosta puuttuvat biopolttoaineet, sillä niiden ominaisuudet riippuvat raaka-aineesta. Esimerkiksi Yasin ym. (2019, luku 11) ovat listanneet biopolttoaineiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia raaka-ainekohtaisesti.

Taulukosta 1 näkyy, että raskas polttoöljy (HFO), nesteytetty maakaasu (LNG), metanoli ja nesteytetty vety varastoidaan normaalissa, 1 baarin, paineessa. Ammoniakki puolestaan vaatii 10 baarin paineen pysyäkseen nestemäisenä. Useimpien polttoaineiden kohdalla varastointilämpötila ei aiheuta haasteita. LNG vaatii kuitenkin -162 celsiusasteen lämpötilan pysyäkseen nestemäisenä. Siksi LNG:tä säilytetään tähän tarkoitukseen suunnitelluissa, jäähdytetyissä LNG-erikoisvarastointitankkeissa. Vedyn varastointi laivoilla on puolestaan vaikeaa, sillä sen säilyminen nestemäisenä vaatii peräti -253 celsiusasteen lämpötilan. Vety on käytännössä varastoitava nestemäisenä, sillä kaasumaisena se vaatisi huomattavasti tilaa tai vaihtoehtoisesti monen sadan baarin paineastiat.

Energiatiheys (engl. energy density) kuvaa energiamäärää polttoaineen massaa kohti (esim. joule tai kilowattitunti per kilogramma, ks. taulukko 1). Spesifinen energia puolestaan kuvaa energiamäärää tilavuusyksikköä kohti (esim. joule per kuutiometri). Korkea energiatiheys ja spesifinen energia ovat suotuisia ominaisuuksia laivojen polttoaineille, sillä tällaisten polttoaineiden varastointi vie vähemmän tilaa. (Law ym. 2021, 8.) Metanolilla ja ammoniakilla on matala energiatiheys verrattuna raskaaseen polttoöljyyn (HFO) ja LNG:hen. Vedyn energiatiheys on puolestaan noin kolminkertainen HFO:hon nähden (ks. taulukko 1). Vedyn varastointi vaatii kuitenkin huomattavasti tilaa, koska sillä on matala spesifinen energia (Law ym. 2021, 8). Tästä antaa viitteitä myös tiheys, joka on vedyllä merkittävästi pienempi kuin muilla taulukossa 1 esitetyillä polttoaineilla. Tämä tekee vedystä hankalan polttoaineratkaisun meriliikenteessä, mutta tultavaisuudessa mahdollisesti yleistyvien polttokennojen polttoaineratkaisuna se saattaa yleistyä. Niiden hyötysuhde on polttomootoria parempi, ja polttokennoilla vedyn sisältämä energia on mahdollista muuntaa suoraan sähköenergiaksi.

Polttoaineen lämpöarvo (taulukossa 1 ”LHV”) puolestaan kuvaa sitä, kuinka paljon lämpöenergiaa täydellisessä palamisessa syntyy polttoaineen massaa kohti. Korkea lämpöarvo on siis hyvä ominaisuus polttoaineelle kuten korkea energiatiheys ja spesifinen energiakin. Itsesyttymislämpötila (engl. auto ignition point) on alin lämpötila, jossa aine syttyy palamaan itsestään eli ilman ulkoista syttymislähdettä, kuten liekkiä tai kipinää. Alhainen polttoaineen itsesyttymislämpötila on tämän vuoksi oleellinen asia puristussytytteisille moottoreille. Taulukosta 1 näkyy, että LNG:llä, metanolilla, ammoniakilla ja vedyllä on korkeat itsesyttymislämpötilat verrattuna raskaaseen polttoöljyyn. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että puristussyttymisen sijaan moottorissa käytetään pilottipolttoainetta näiden polttoainetyyppien sytyttämiseen. Pilottipolttoaineena voidaan periaatteessa käyttää HFO:ta tai kevyttä polttoöljyä (MDO/MGO), mutta käytännössä se on lähes aina kevyttä polttoöljyä (MDO/MGO). Tämä johtuu siitä, että monipolttoainemoottoreita käyttäviin aluksiin ei välttämättä ole asennettu lainkaan HFO:n vaatimia polttoaineen esikäsittelyjärjestelmiä. Pilottipolttoaineen määrät vaihtelevat moottorityypeittäin. Esimerkiksi LNG:n sytyttämiseen tarvitaan noin 1,0–1,5 massaprosenttia MGO:ta; tosin joissain moottoreissa määrät voivat olla selkeästi suurempia (3–4 massa-%). Metanolimoottoreissa pilottipolttoaineen osuus voi olla 15–20 massaprosenttia. Koska pilottipolttoaineet ovat fossiilisia energianlähteitä, niiden käytöstä syntyy fossiilisia kasvihuonekaasupäästöjä, vaikka pääasiallinen energianlähde olisikin hiiletön polttoaine, kuten ammoniakki.

Kuten taulukosta 1 näkyy, vety, ammoniakki, metanoli ja LNG ovat rikkittömiä polttoaineita, jolloin niiden polttamisesta ei synny rikkipäästöjä. Tämä on iso etu, sillä rikkipäästöt ovat monin tavoin haitallisia sekä ympäristölle että ihmisille. Rikkipäästöt aiheuttavat muun muassa merten happamoitumista (Bengtsson ym. 2014, 48). Rikkinyhdisteet ovat myrkyllisiä ihmisille, ja niiden päästöt aiheuttavat muun muassa hengitystieoireita (Bengtsson ym. 2014, 48; Aakko-Saksa ym. 2023, 2–3).

**Taulukko 1.** Merenkulun polttoaineiden ominaisuuksia. Lähde: Seddiek ym. (2023, 3).

Polttoaine	HFO	LNG	Meta-noli	Nestey-tetty vety	Nestey-tetty ammo-niikki
Varastointipaine (bar)	1,0	1,0	1,0	1,0	10
Varastointi-lämpötila (°C)	40	-162	20	-253	20
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	950	450	792	70,8	600
LHV* (MJ/kg)	40,2	50	19,9	120	18,6
Energiatiheys (kWh/kg)	11,17	15,33	6,3	33,33	5,17
Rikkipitoisuus (wt%)	0,41**	0	0	0	0
Itsesyttymis-lämpötila (°C)	250	595	470	500	650

\*LHV tarkoittaa alemmaa eli tehollista lämpöarvoa (lower heating value)

\*\* HFO:ta eli raskasta polttoöljyä on useita eri laatuja, joiden rikkipitoisuudet vaihtelevat. Tähän taulukkoon on vertailun vuoksi laitettu Seddiek ym. (2023) ilmoittama arvo.

## Biopolttoaineiden soveltuvuus nykyisiin merimoottoreihin

Osa biopolttoaineista sopii merenkulussa niin sanotuiksi drop-in-ratkaisuiksi, jotka soveltuvat nykyisin merenkulussa käytettäviin moottorityypppeihin. Tällainen on esimerkiksi FT-diesel (Fischer-Tropsch-diesel), jota voidaan käyttää nykyisissä dieseleillä, kuten kaasuöljyllä (MGO), toimivissa moottoreissa. HVO (hydrotreated vegetable oil) sopii useimpiin dieselmoottoreihin sellaisenaan, kun taas FAME:n (Fatty acid methyl ester) käyttö saattaa vaatia niihin pieniä muutoksia. DME:n (dimetyylieetteri) käyttö puhtaana vaatii kyseiselle polttoaineelle modifioidun moottorin, ja polttoaineseoksessakin sen käyttö edellyttää yleensä teknisiä muutoksia dieselmoottoreihin. (EMSA 2023a, 19–21.) Polttoaineseoksessa DME:tä sekoitetaan MGO:hon tai dieselöljyyn (MDO). EMSA:n (2023a, 21) mukaan DME:tä voi käyttää vain pienenä seospolttoaineen osuutena nykyisissä moottoreissa, ja se soveltuneekin heikosti merenkulun drop-in-polttoaineeksi.

Bioetanolilla voidaan korvata tisleiden, kuten MGO:n, käyttöä merenkulussa, mutta polttoaine vaatii sille erikoistuneet polttoainejärjestelmät ja

moottorin. Lisäksi bioetanolin käyttöä merimoottoreissa ei ole riittävästi testattu, joten sen käyttäytymisestä on heikosti saatavilla luotettavaa tietoa. Bioetanolimoottorien on kuitenkin arvioitu tulevan markkinoille jo lähivuosina. (EMSA 2023a, 23.)

SVO (straight vegetable oil) on bioöljy, joka soveltuu HFO:ta, IFO:a (intermediate fuel oil) ja vastaavia polttoöljytyyppejä käyttäviin moottoreihin. SVO:ta voidaan periaatteessa käyttää sellaisenaan, mutta seospolttoaineen käyttö vähentää riskejä kyseisestä polttoaineesta aiheutuville teknisille ongelmille. Pyrolyysiöljy on myös bioöljy, mutta se ei sovelly nykyisiin merimoottoreihin edes seoksena. Lisäksi sen ominaisuudet eroavat fossiilisten polttoöljyjen ominaisuuksista muun muassa siksi, että se on hapan ja aiheuttaa korroosiota. Pyrolyysiöljyn varastointi aiheuttaa ongelmia, sillä sen viskositeetti kasvaa varastoinnin aikana. Viskositeetin kasvaminen rajoittaa pyrolyysiöljyn varastoinnin muutamaa kuukauteen. Toisaalta pyrolyysiöljyä voidaan jatkojalostaa vetykäsittelyllä. (EMSA 2023a, 25–26.) Tällainen vetykäsittely pyrolyysiöljy ”saattaisi soveltua [merenkulun] dieselmoottorien käyttöön” EMSA:n (2023a, 26) mukaan.

HTL-bioöljy (HTL tulee sanoista Hydrotreated liquefaction) ei sovi sellaisenaan merimoottoreihin, mutta sitä voidaan käyttää seoksissa residuaalipolttoaineiden (HFO tai IFO) kanssa. Vaihtoehtoisesti siitä voidaan jatkojalostaa parempilaatuista drop-in-polttoainetta, jota voidaan käyttää MGO:n tai MDO:n sijaan. Myös solvolyyysiöljy soveltuu seospolttoaineisiin polttoöljyillä toimivissa moottoreissa (DNV s.a)

Nesteytetty biometaani on nesteytetyn maakaasun tavoin kaasumainen polttoaine, jota voidaan käyttää nykyisissä LNG:llä toimivissa merimoottoreissa. Biometaanin koostumus on myös lähes sama kuin LNG:llä, jolla metaanin osuus polttoaineesta on yleensä yli 80 prosenttia. Meripolttoaineena käytettävässä LNG:ssä osuus on yleensä yli 90 prosenttia. Sitä voidaan varastoida nesteytetyn kaasun säilytykseen erikoistuneissa polttoainetankeissa. (EMSA 2023a, 28–30.)

## Metanolin, ammoniakkin ja vedyn soveltuvuus nykyisiin merimoottoreihin

Metanoli, ammoniakki ja vety eivät sovellu nykyisten merimoottorien polttoaineiksi. Näiden polttoaineiden käyttöä varten alus vaatii uudet moottorit tai nykyisiin moottoreihin on tehtävä huomattavia ja useimmi-

ten kalliita muutoksia. Tällainen retrofit-prosessi voi olla jopa kalliimpi kuin uusi moottori, ja lopputulos voi silti olla ominaisuuksiltaan huonompi verrattuna kyseiselle polttoainevaihtoehdolle varta vasten suunniteltuun moottoriin.

Esimerkiksi Wang ym. (2021, 470) arvion mukaan metanolille soveltuvan polttomoottorin retrofit-prosessi maksaa noin 330 dollaria kilowattia kohti. Uuden metanolimoottorin hankinta puolestaan maksaa noin 260–500 dollaria kilowattia kohti riippuen siitä, onko moottori kaksi- vai nelitahtinen. Vedylle retrofit-kustannus on estimaatin mukaan jopa 900 dollaria kilowattia kohti ja uuden, kaksitahtisen, polttomoottorin kustannus noin 400 dollaria. Toisaalta uuden nelitahtisen vetymoottorin hinta-arvio lähestyy 900 dollaria kilowattitunnilta. Ammoniakkimoottorin hinta-arvio on puolestaan uutena noin 370 dollaria (kaksitahtinen) tai 600 dollaria (nelitahtinen) kilowattia kohti. (Wang ym. 2021, 470.) Lagemann ym. (2022, 7) mukaan vähärikkisellä polttoöljyllä toimivan moottorin retrofit-prosessi ammoniakkimoottoriksi maksaisi noin 2,5 kertaa enemmän kuin konvertointi metanolimoottoriksi. On kuitenkin huomioitava, että kirjallisuusestimaatit uusien moottorien kustannuksista ja retrofit-kustannuksista ovat vain arvioita. Hintojen kehittymiseen vaikuttavat muun muassa teknologian kehittyminen sekä kysynnän ja tarjonnan tasapaino.

## Laivaliikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöt

Merenkulun konventionaalisten, fossiilisten, polttoaineiden käytössä noin 96 prosenttia kasvihuonekaasupäästöistä (KHK) syntyy polttoaineiden palamisesta moottorissa (Chatzinikolaou & Ventikos 2015, 120). Sen sijaan vaihtoehtoisten polttoaineiden käytössä tuotantoprosessin aikana syntyvät päästöt ovat usein ratkaisevassa asemassa, kun arvioidaan polttoaineen kokonaiskestävyyttä. Bouman ym. (2017, 415) arvioivat, että biopolttoaineiden käyttö merenkulussa voi vähentää toimialan päästöjä nykyisestä 25–84 prosenttia. Estimaatin laajuus johtuu siitä, että biopolttoaineen päästöt riippuvat siitä, mitä raaka-ainetta sen valmistuksessa on käytetty (ks. kuva 1). Maakaasusta valmistetun ammoniakkin käyttö voi lisätä merenkulun päästöjä, kun taas e-ammoniakin käyttö voi puolestaan vähentää päästöjä noin 85 prosenttia verrattuna HFO:n ja MGO:n käyttöön (EMSA 2022, 30). Vaihtoehtoisia polttoaineita tutkittaessa onkin tärkeä tehdä elinkaarianalyysyjä, joissa huomioidaan polttoaineen koko elinkaaren aikaiset päästöt. Elinkaaren aikaisiin päästöihin kuuluvat tuotannon, kuljetuksen ja kulutuksen aikaiset päästöt. Tässä luvussa

käsitellään merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotannosta ja kulutuksesta syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä. Näitä vertaillaan myös merenkulun konventionaalisten polttoaineiden eli raskaan polttoöljyn (HFO) ja kaasuöljyn (MGO) päästöihin.

Taulukko 2 esittää eri polttoainetyyppien tuotannosta syntyvää kasvihuonekaasupäästöjen määrää (tuotettua) megajoulea kohti. Päästöissä ovat mukana hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidipäästöt ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  ja  $\text{N}_2\text{O}$ ). Taulukosta näkyy, että maakaasusta tuotetun ammoniakkin päästöt ovat noin nelinkertaiset maakaasusta tuotettuun metanoliin verrattuna. Metanolin valmistuksen päästöt ovat puolestaan yli kaksinkertaiset raskaaseen polttoöljyyn ja kaasuöljyyn verrattuna.

Moottorissa palaessaan MGO ja HFO tuottavat kuitenkin enemmän KHK-päästöjä kuin maakaasusta valmistetut ammoniakki ja metanoli (ks. taulukko 3). Polttoainegrammaa kohti MGO:n ja HFO:n hiilidioksidipäästöt ovat yli kaksinkertaiset metanoliin verrattuna. On kuitenkin huomattava, että metanolia kuluu moottorissa HFO:ta ja MGO:ta enemmän, koska sillä on matalampi energiatiheys (ks. luvussa *Polttoaineiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet* esitetty taulukko 1). Siksi onkin arvioitu, että kokonaisuudessaan maakaasusta tuotetun metanolin käyttö voi vähentää aluksen  $\text{CO}_2$ -päästöjä vain 7–10 prosenttia perinteisten polttoöljyjen käyttöön verrattuna (Bureau Veritas 2023; Wärtsilä 2023). Metaani- ja dityppioksidipäästöjä puolestaan syntyy HFO:n ja MGO:n käytöstä 10 prosenttia enemmän kuin metanolin käytöstä. Koska nämä päästöt on taulukossa 3 ilmoitettu energiayksikköä kohti, määrää ei tarvitse enää suhteuttaa polttoaineen kulutukseen. Tällä 10 prosentin vähennyksellä on ilmastomuutoksen kannalta isompi merkitys kuin arvioidulla 10 prosentin vähennyksellä hiilidioksidipäästöissä. Tämä johtuu siitä, että metaani on arviolta 25 kertaa hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu ja dityppioksidi arviolta 298 kertaa voimakkaampi (U.S. Environmental Protection Agency [EPA] 2014, 5).

Ammoniakin ( $\text{NH}_3$ ) käytöstä ei synny hiilidioksidi- eikä metaanipäästöjä, sillä se ei sisällä ollenkaan hiiltä. Koska ammoniakki sisältää paljon typpeä, sen palaessa muodostuu dityppioksidipäästöjä, joita on säädeltävä, jos ammoniakkin käyttö yleistyy laivaliikenteessä (DNV 2022). Esimerkiksi EMSA (2022, 29) huomauttaa, että pienikin  $\text{N}_2\text{O}$ -päästö määrä voi heikentää ammoniakkin käytön ilmastohyötyjä merkittävästikin. Tässä artikkelissa ei ole arvioitu ammoniakkin aiheuttamia dityppioksidipäästö määriä, sillä niistä on saatavilla heikosti dataa (Ship & Bunker 2024). Päästöjen muodostuminen riippuu myös hyvin paljon palamisprosessista: DNV:n

mukaan ammoniakkin dityppioksidipäästöt ovat iso haaste, mutta niitä voidaan vähentää optimoimalla palamislämpötilaa ja -painetta moottorissa (DNV 2022).

Maakaasusta valmistetut ammoniakki ja metanoli eivät siis juurikaan vähentäisi laivaliikenteen KHK-päästöjä HFO:n ja MGO:n käyttöön verrattuna ainakaan, kun tarkastellaan polttoaineen koko elinkaaren aikaisia päästöjä. Päästöt saattaisivat vähentyä vain jonkin verran tai pahimmassa tapauksessa lisääntyä.

Koska ammoniakki on hiiletön polttoaine, vihreästä vedystä tuotettu e-ammoniakki tarjoaa hyvin vähäpäästöisen ratkaisun laivaliikenteeseen. Vihreän, eli uusiutuvalla energialla tuotetun, vedyn tuotanto ei aiheuta juurikaan kasvihuonekaasupäästöjä. Siten koko elinkaaren aikaisiksi kasvihuonekaasupäästöiksi jäisivät ammoniakilla vain dityppioksidipäästöt, jotka syntyvät polttoaineen palaessa moottorissa.

Yhtä lailla e-metanolin tuotannon kasvihuonekaasupäästöt voidaan saada lähes nolnaan, jos tuotannossa käytetään vihreää vetyä. E-metanoli aiheuttaa kuitenkin moottorissa palaessaan hiilidioksidipäästöjä, koska polttoaine sisältää hiiltä. Moottorissa syntyvät KHK-päästöt ovat samat kuin maakaasusta tuotetulla metanolilla, eli käytönaikaiset päästöt vähenisivät vain noin 7–10 prosenttia HFO:n käyttöön verrattuna.

Oleellista onkin se, mistä e-metanolin valmistukseen tarvittava hiilidioksidi on peräisin. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen laitoksista, joissa poltetaan fossiilisia energianlähteitä. IRENA (International Renewable Energy Agency 2021, 44) pitää tällä tavoin tuotettua e-metanolia vähähiilisenä polttoaineena, sillä ilman talteenottoa hiilidioksidi siirtyisi ilmakehään tuotannon prosesseista. Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen myös biogeenisistä lähteistä tai suoraan ilmakehästä e-metanolin tuotantoa varten. Tällöin IRENA (2021, 44) määrittelee e-metanolin olevan hiilineutraalia. Biogeenisiksi lähteiksi luokitellaan esimerkiksi kiinteän yhdyskuntajätteen poltosta syntyvä hiilidioksidi ja biomassaa polttavista sähköntuotantolaitoksista syntyvä hiilidioksidi (IRENA 2021, 44). Etenkin Suomessa on paljon metsäteollisuutta, josta syntyy biopohjaista hiilidioksidia, jota saataisiin talteenotossa metanolin raaka-aineeksi. Hiilidioksidin talteen ottaminen ilmakehästä vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta tehden prosessista hiilinegatiivisen. Menetelmän käyttö ei vielä toistaiseksi ole kustannustehokasta, sillä teknologian kehitys prosessia varten on vielä melko alkuvaiheessa (Elfving 2021, 22).

**Taulukko 2.** Eri polttoainetyyppien tuotannonaikaiset kasvihuonekaasupäästöt (hiilidioksidiekvivalenttigrammoina per megajoule). Lähde: FuelEU Maritime -asetus (EU/2023/1805).

Polttoaine	Tuotannosta syntyvät päästöt (gCO <sub>2</sub> -ekv/MJ)
Raskas polttoöljy (engl. Heavy Fuel Oil, HFO)	13,5
Kaasuöljy (engl. Marine Gas Oil, MGO)	14,4
Metanoli (valmistettu maakaasusta)	31,3
Ammoniakki (valmistettu maakaasusta)	121

**Taulukko 3.** Eri polttoainetyyppien käytönaikaiset kasvihuonekaasupäästöt.

Päästö-laji	Yksikkö	Polttoainetyyppi			
		HFO*	MGO*	Metanoli (maakaasusta)*	Ammoniakki (maakaasusta)**
CO <sub>2</sub>	g/polttoainegramma ***	3,114	3,206	1,375	0
CH <sub>4</sub>	g/kWh	0,01	0,01	0,001	0
N <sub>2</sub> O	g/kWh	0,034	0,03	0,003	Ei tiedossa

\* Lähteet: FuelEU Maritime -asetus (EU/2023/1805), IMO (2020, 412)

\*\*Lähteet: FuelEU Maritime -asetus (EU/2023/1805), DNV (2022), Ship & Bunker (2024)

\*\*\* Koska hiilidioksidipäästöt on ilmoitettu polttoainegrammaa kohti energiayksikön sijaan, päästöjen vertailussa pitää huomioida, paljonko polttoainetta kuluu moottorissa.

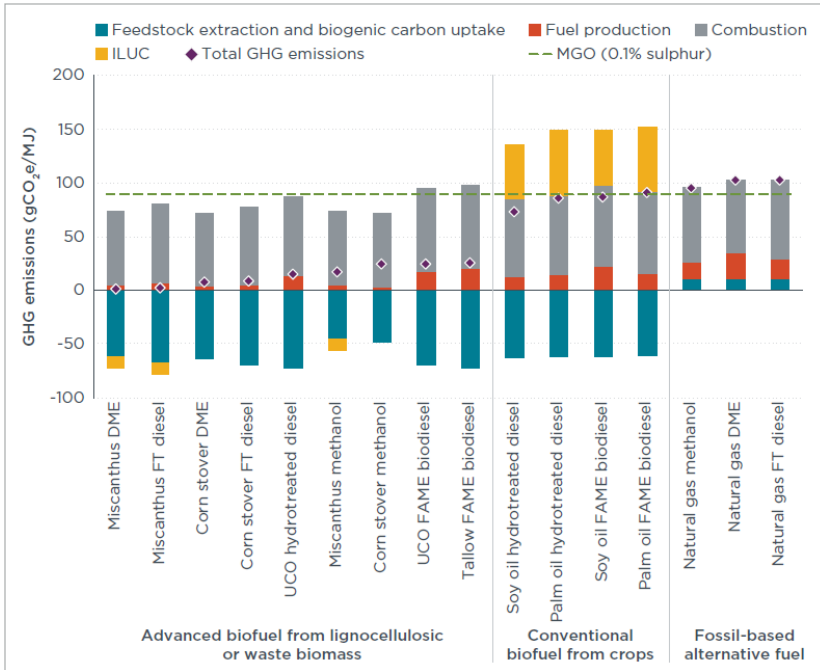
Vedyn (H<sub>2</sub>) tuotannon päästöt riippuvat siitä, onko vety valmistettu maakaasusta, kivihiilestä vai uusiutuvalla energialla (vihreä vety). Eri tuotantotavoista syntyviä päästöjä on käsitelty tämän julkaisun artikkelissa *Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden valmistusprosessit*. Käytön aikana eli moottorissa palaessaan vety ei aiheuta ollenkaan kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä johtuu siitä, että vety on hiiletön polttoaine, eikä sen palaessa muodostu myöskään metaani- tai dityppioksidipäästöjä.

Myös biopolttoaineilla koko elinkaaren aikaisiin päästöihin vaikuttavat merkittävästi tuotannon päästöt, jotka puolestaan riippuvat biopolttoaineen raaka-aineesta. Kuva 1 havainnollistaa biopolttoaineiden päästövähennyspotentiaalia suhteessa kaasuöljyyn. Kuvassa violetti vinoneliö esittää koko elinkaaren aikaista päästömäärää, ja elinkaaren eri vaiheissa syntyvät päästöt on eritelty eri väreillä. Moottorissa palaessaan bio-

polttoaineet tuottavat suunnilleen saman määrän päästöjä (kuvassa 1 harmaa palkki) kuin MGO.

Kuvasta 1 näkyy, että niin kutsutuilla toisen sukupolven biopolttoaineilla saadaan aikaan suurimmat päästövähennykset. Nämä polttoaineet on tuotettu lignoselluloosapohjaisesta biomassasta tai jätteistä (kuvassa englanniksi ”advanced biofuel from lignocellulosic or waste biomass”). Tämän ryhmän biopolttoaineiden päästöt ovat 70–100 prosenttia pienemmät kuin MGO:n elinkaaren aikaiset päästöt. Käytönaikaiset päästöt kompensoituvat sillä, että biomassalla sitoo kasvaessaan hiilidioksidia ilmakehästä (kuvassa sininen palkki). Polttoaineen valmistuksen aikaiset päästöt (punainen palkki) ovat vähäiset, sillä prosessiin tarvittavan fossiilienergian määrä on vähäinen. (ICCT 2020, 11–12.) Lisäksi ICCT:n arvion mukaan energiakasvien, kuten norsunheinän (*miscanthus*), kasvatuksesta aiheutuvat maankäytön muutoksen (englanninkielinen lyhenne ILUC, kuvassa keltainen palkki) päästöt ovat vähäiset. Tämä johtuu siitä, että norsunheinän kasvatukseen voidaan käyttää maata, jolla ei ole kannattavaa viljellä ruokakasveja. Parhaimmillaan tällaisten energiakasvien ILUC-päästöt voivat olla jopa negatiiviset, jos kasveja viljellään joutomailla, joilla ei ole alun perin ollut hiilidioksidia sitovaa kasvillisuutta. (ICCT 2020, 11–12.)

Perinteisiä biopolttoaineita valmistetaan ravintona käytettävistä viljelykasveista (kuvassa 1 englanniksi ”Conventional biofuel from crops”). Näiden biopolttoaineiden elinkaaren aikaiset päästöt ovat korkean ILUC-päästömäärän takia samaa luokkaa MGO:n päästöjen kanssa. Suuri ILUC-päästöjen määrä johtuu siitä, että viljelykasveja voitaisiin käyttää myös ruokakasveina. Kun ruokakasveja hyödynnetään energianlähteiksi, ruuantuotanto siirtyy muualle. Ruuantuotannon siirtämiseksi saatetaan hakata metsää uusilta alueilta. (ICCT 2020, 11–12.)



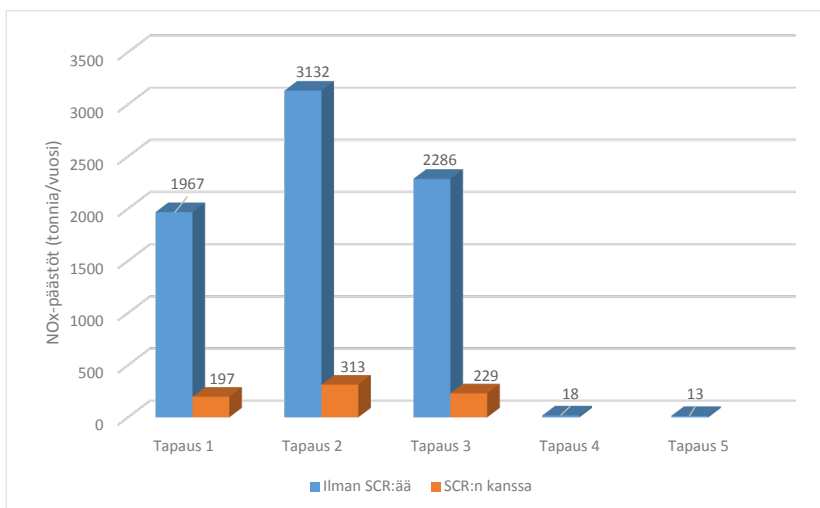
Kuva 1. Kuva havainnollistaa merenkulun biopolttoaineiden sekä erilaisten maakaasupohjaisten polttoaineiden elinkaarenaikaisia päästöjä (merkitty violetilla vinoneliöllä) verrattuna kaasuöljyyn (MGO, päästöt vihreällä katkoviivalla). Sininen palkki havainnollistaa raaka-aineen talteenotosta syntyvien KHK-päästöjen osuutta sekä hiilidioksidipäästöjä, jotka ovat sitoutuneet ilmakehästä biomassaan sen kasvun aikana. Muut tuotannon aikana syntyvät päästöt on merkitty punaisella ja käytön aikana syntyvät päästöt harmaalla palkilla. Keltainen palkki (ILUC) kuvaa tuotannosta aiheutuvia maankäytön muutoksista syntyviä epäsuoria KHK-päästöjä. Suomenokset: Miscanthus = norsunheinä, corn stover = maissintähkä, UCO = käytetty paistorasva, tallow = tali, soy oil hydrotreated diesel = soijaöljystä tehty vetykäsitelty diesel, palm oil = palmuöljy, natural gas = maakaasu, advanced biofuel from lignocellulosic or waste biomass = kehittynyt biopolttoaine lignoselluloosapohjaisesta tai jätebiomassasta, conventional biofuel from crops = perinteinen viljelykasveista valmistettu biopolttoaine, fossil-based alternative fuel = fossiilipohjainen vaihtoehtoinen polttoaine. Kuva: ICCT (2020, 12).

## Vaihtoehtoisten polttoaineiden muut päästöt

Meriliikenne tuottaa kasvihuonekaasujen ohella merkittäviä määriä muitakin päästöjä: vuosien 2007–2012 välillä merenkulku aiheutti 15 prosenttia globaaleista rikkipäästöistä ja 13 prosenttia globaaleista typpipäästöistä (IMO 2015, 117). Lisäksi merenkulku tuottaa häkä- ja pienhiukkaspäästöjä (Foretich ym. 2021, 1; Wärtsilä s.a.). Rikki- ja typpioksidipäästöt heikentävät ilmanlaatua aiheuttaen esimerkiksi hengitystieongelmia ja -sairauksia, kuten astmaa ja ennenaikaisia kuolemia (Aakko-Saksa ym. 2023, 3). Lisäksi rikkipäästöt happamoittavat vesistöjä

ja metsiä, kun taas typen päästöt aiheuttavat vesistöjen rehevöitymistä, mikä on ongelma etenkin Itämerellä. Muidenkin päästöläjien kuin kasvihuonekaasupäästöjen tarkastelu onkin tärkeää, kun pohditaan ratkaisuja meriliikenteen vähähiiliseksi energianlähteiksi.

Metanoli, ammoniakki ja vety ovat rikkittömiä polttoaineita, joten niiden käytöstä merenkulussa ei synny rikkipäästöjä. Vedyn käytöstä polttokennoissa ei synny myöskään pienhiukkas- eikä typpipäästöjä. Jos vetyä käytettäisiin laivoissa polttomoottorissa, typenoksidipäästöjä voisi periaatteessa muodostua jonkin verran. Tämä johtuu siitä, että ilma sisältää typpeä, joten vedyn palaessa eli reagoidessa hapen kanssa polttomoottorissa myös typenoksideja (NO<sub>x</sub>) saattaisi muodostua sivutuotteena. Tällä hetkellä vaikuttaa kuitenkin epätodennäköiseltä, että vetyä alettaisiin käyttää laivoilla polttomoottorissa polttokennojen sijaan (ks. luku *Vaihtoehtoisten polttoaineiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet*).



*Kuva 2. Seddiek ym. (2023, 11) tapaustutkimuksen arviot HFO:n ja ammoniakkin käytössä syntyvistä typenoksidipäästöistä roro-aluksella. SCR-tekniikalla (Selective Catalytic Reduction) eli selektiivisellä katalyyttisellä pelkistämisellä polttoaineen typpioksidipäästöjä vähennetään katalysaattorilla. Tapaus 1: HFO dieselmoottorissa. Tapaus 2: Sininen ammoniakki dieselmoottorissa. Tapaus 3: Vihreä ammoniakki dieselmoottorissa. Tapaus 4: Sininen ammoniakki polttokennossa (SOFC). Tapaus 5: Vihreä ammoniakki polttokennossa.*

Seddiek ym. (2023, 1–16) ovat arvioineet tapaustutkimuksessaan ammoniakilla kulkevan roro-aluksen vuotuisia typenoksidipäästöjä ja verranneet sitä HFO:n käytön päästöihin. Kuva 2 havainnollistaa tapaustutkimuksen tuloksia, joissa on huomioitu vain käytönaikaiset päästöt. Tulosten mukaan ammoniakkin käyttö polttomoottorissa lisäisi roro-aluksen typenoksi-

dipäästöjä HFO:n käyttöön verrattuna. Tämä pätee etenkin maakaasusta tuotetulle ammoniakille (sininen ammoniakki). Toisaalta päästöjä voidaan vähentää huomattavasti käyttämällä SCR-katalysaattoritekniikkaa (selective catalytic reduction). SCR-tekniikasta huolimatta sinisen ammoniakin käytöstä syntyisi noin 100 000 tonnia enemmän dityppioksidipäästöjä vuodessa verrattuna HFO:n käyttöön ja vihreän ammoniakin käytöstä noin 30 000 tonnia enemmän (Seddiek ym. 2023, 1–16).

Jos roro-aluksessa olisi polttomoottorin sijaan käytössä (kiinteäoksidi) polttokennot (SOFC, englannin kielen sanoista Solid Oxide Fuel Cell), typpioksidipäästöjä muodostuisi vähemmän kuin HFO:n käytöstä. Tämä johtuu siitä, että polttokennossa polttoaine ei pala eli ei reagoi hapen kanssa, jolloin typen oksideita (NO<sub>x</sub>) ei juuri muodostu. Seddiek ym. (2023, 9–11) tutkimuksen lukuja on pidettävä viitteellisinä, sillä vuotuisia päästöjä on arvioitu vain yhdellä laivatyyppillä. Tulosten perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että ammoniakin käyttö polttomoottorissa voi lisätä typenoksidipäästöjä HFO:n käyttöön verrattuna, kun taas polttokennossa muodostuisi vain vähän typenoksidipäästöjä. Myös Nadimi ym. (2022, 10) tutkimuksen mukaan ammoniakin käyttö polttomoottorissa lisää dityppioksiidi- ja typpidioksidipäästöjä (N<sub>2</sub>O ja NO<sub>2</sub>) verrattuna dieselöljyn käyttöön.

Pienhiukkaspäästöjen määrää saadaan sen sijaan merkittävästi vähennettyä, kun polttomoottorissa käytetään ammoniakkaa MGO:n tai HFO:n sijaan (Nadimi ym. 2022, 11; Maersk Mc-Kinney Moeller Center for Zero Carbon Shipping 2023, 10). Parhaimmillaan hiukkaspäästövähennemä voi olla jopa yli 90 prosenttia (Maersk Mc-Kinney Moeller Center for Zero Carbon Shipping 2023, 10).

Taulukko 4 esittää biometanolin, fossiilisen metanolin ja biokaasun päästöjä verrattuna HFO:n, MGO:n ja LNG:n päästöihin. Taulukosta näkyy, että nesteytetyn maakaasun (LNG) ja nesteytetyn biokaasun (LBG) typenoksidipäästöt ovat hyvin pienet, mikä onkin niiden suuri etu ympäristön kannalta. Taulukossa on oletettu, että metanolin typenoksidipäästöt ovat samat kuin HFO:lla ja MGO:lla. Todelliset arvot voivat kuitenkin erota oletetuista. Metanolimoottoreiden päästöistä on toistaiseksi saatavilla rajoitetusti tiedeyhteisön käytössä olevaa, avointa mittausdataa operoitaessa todellisissa olosuhteissa, koska metanolimoottoreita ei ole juuriakaan vielä käytössä aluksilla. Joka tapauksessa taulukon TIER III -arvoihin pääsemiseksi aluksella on käytettävä SCR-katalysaattoria typenoksidien vähentämiseen, jos alus kulkee HFO:lla, MGO:lla tai metanolilla. TIER II -arvot puolestaan voidaan täyttää ilman katalysaattoria uudemmilla

moottorityypeillä (Wärtsilä, s.a.). Pienhiukkaspäästöt ( $PM_{2.5-10}$  ja  $PM_{2.5}$ ) ovat sen sijaan metanolilla huomattavasti pienemmät kuin HFO:lla ja MGO:lla, mutta isommat kuin LNG:llä ja LBG:llä, joiden pienhiukkaspäästöt ovat käytännössä olemattomat. Metanoli tuottaa moottorissa palaessaan saman verran KHK-päästöjä riippumatta siitä, onko metanoli tuotettu maakaasusta vai biomassasta.

Taulukossa olevien päästölajien lisäksi on huolena, että metanolin palaessa moottorissa voi syntyä formaldehydiä ja muurahaishappoyhdisteitä (IRENA 2021, 114). Formaldehydi aiheuttaa akuutin myrkytysvaaran joutuessaan iholle ja hengitysteihin, syövyttää voimakkaasti ihoa ja voi vaurioittaa silmiä. Lisäksi sille altistuminen voi aiheuttaa syöpää. (Työterveyslaitos s.a.)

**Taulukko 4.** Arvioita eri polttoainevaihtoehtojen typenoksidi- ja pienhiukkaspäästöistä (g/kWh). Todelliset päästöt riippuvat aina moottorityypistä, kuormituksesta ja polttoaineen laadusta, joten arvot ovat viitteellisiä. Taulukon arvoissa on oletuksena, että kyseinen moottori tuottaa NO<sub>x</sub>-päästöjä juuri TIER-raja-arvojen salliman määrän verran. MeOH (foss.) tarkoittaa maakaasusta valmistettua metanolia ja MeOH (bio) biomassasta valmistettua metanolia. LGB (liquefied biogas) on nesteytetty biokaasu Lähteet: FuelEU Maritime -asetus (EU/2023/1805) ja IMO (2020, 409–416).

Yksikkö	Päästö-laji	HFO	MGO	LNG	MeOH (foss.)	MeOH (bio)	LBG
g/kWh	NO <sub>x</sub> (TIER II) *	10.50	10.50	-	10.50	10.50	-
	NO <sub>x</sub> (TIER III)*	2.60	2.60	0.83	2.60	2.60	0.83
	PM <sub>2.5-10</sub>	0.0640	0.0144	1.8E-4	5E-4	5E-4	1.8E-4
	PM <sub>2.5</sub>	0.7360	0.1656	0.0	0.006	0.006	0.0

\*TIER-rajat ovat Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) määrittämät sitovat rajat alusten typenoksidipäästöille. Rajat riippuvat moottorin kierrosluvusta. TIER II -raja koskee vuonna 2011 ja sen jälkeen rakennettuja aluksia. TIER III -raja koskee tiettyjä aluksia, jotka kulkevat niin kutsutuilla ECA-alueilla (Emission Control Area), joihin Itämeri kuuluu. (IMO 2008.) LNG:n ja LBG:n NO<sub>x</sub>-päästöt ovat hyvin vähäiset, kun taas muiden taulukossa olevien polttoaineiden on oletettu täyttävän TIER-rajat juuri ja juuri. Siksi HFO:n, MGO:n ja metanolin NO<sub>x</sub>-päästöt ovat taulukossa samat. Metanolin todellisiin NO<sub>x</sub>-päästöihin liittyy epävarmuutta, sillä metanolimoottoreita ei ole juurikaan vielä käytössä aluksilla. Joka tapauksessa aluksella on käytettävä SCR-tekniikkaa TIER III -rajojen täyttämiseksi, jos moottorissa käytetään HFO:ta, MGO:ta tai metanolia.

Ajatushautomo International Council on Clean Transportation raportoi kirjallisuuskatsauksessaan (ICCT 2020, 1–31) eri biopolttoainetyyppien päästömääriä. Biopolttoaineet, joita artikkeli käsittelee, ovat biometanoli, FAME-biodiesel, vetykäsitelty uusiutuva kasviöljy (HVO eli hydrotreated vegetable oil), FT-diesel ja dimetyylieetteri (DME). Nämä ovat käytännössä rikkittäviä polttoaineita eli rikinoksidipäästöjä ei synny juuri lainkaan (ICCT 2020,31).

Typenoksidi- ja pienhiukkaspäästöjen määrä puolestaan vaihtelee polttoaineittain, ja eri kirjallisuuslähteiden arviot päästömääristä vaihtelevat. Esimerkiksi HVO:n ja FT-dieselin käytössä NO<sub>x</sub>-päästöt pysyvät samana tai voivat vähentyä enintään 20 prosenttia MGO:n<sup>1</sup> käyttöön verrattuna (Bengtsson ym. 2012, Brynolf 2014, Ushakov ym. 2013, Ushakov & Lefebvre 2019, ICCT:n 2020, 31 mukaan). FAME-biodieselin käyttö voi erään elinkaarianalyysimallin mukaan lisätä moottorissa syntyviä typenoksidipäästöjä 13 prosenttia verrattuna vähärikkisen raskaan polttoöljyn käyttöön (Gilbert ym. 2018, ICCT:n 2020, 31 mukaan). Myös Wärtsilä (2022) arvioi, että FAME saattaa tuottaa 10–12 prosenttia enemmän NO<sub>x</sub>-päästöjä kuin fossiiliset tislepolttoaineet, joista käytetyin merenkulussa on MGO. Toisaalta verrattuna ULSD-polttoaineen (erittäin vähärikkinen dieselöljy) käyttöön NO<sub>x</sub>-päästöt voivat laboratoriotestitulosten mukaan vähentyä 12–29 prosenttia (Geng ym. 2017, ICCT:n 2020, 31 mukaan).

FAME:n käyttö voi vähentää pienhiukkaspäästöjä peräti 75–90 prosenttia vähärikkisen raskaan polttoöljyn käyttöön verrattuna ja MGO<sup>1</sup>:hon verrattuna 38 prosenttia (Gilbert ym. 2018, Brynolf 2014, ICCT:n 2020, 31 mukaan). Laboratoriotestien mukaan HVO:n käyttö lisäsi pienhiukkaspäästöjä 30 prosenttia MGO<sup>1</sup>:hon verrattuna (Ushakov & Lefebvre 2019, ICCT:n 2020, 31 mukaan). FT-dieselin käyttö lisäisi pienhiukkaspäästöjä noin 17 prosenttia laboratoriotestien mukaan. Sen sijaan kirjallisuudessa tehtyjen elinkaarimallien mukaan pienhiukkaspäästöt vähenisivät 24 prosenttia MGO<sup>1</sup>:n käyttöön verrattuna. (Bengtsson ym. 2012, Brynolf 2014, Ushakov ym. 2013, ICCT:n 2020, 31 mukaan.) Koska arviot päästömääristä vaihtelevat kirjallisuuslähteittäin, tässä esitettyihin lukemiin on syytä suhtautua varauksella.

<sup>1</sup> Vertailukohtana on MGO, jonka rikkipitoisuus on 0.5 %. Tämä täyttää kansainvälisen rikkirajoitusvaatimuksen, mutta ei esimerkiksi Itämeren rikkirajoitusta, joka on 0.1 %.

## Vaihtoehtoisten polttoaineiden muut ympäristövaikutukset: biopolttoaineiden öljyvuotoriski

Yksi merenkulun aiheuttamista ympäristöriskeistä on öljyvuotoriski. Uudet merenkulun polttoaineet voivat veteen vuotaessaan käyttäytyä eri tavoin kuin fossiiliset polttoaineet. On myös syytä tutkia, millaisia haittavaikutuksia bioöljyvuodot voivat aiheuttaa vesieliöstölle. Tässä luvussa käsitellään biopolttoaineisiin liittyvää öljyvuotoriskiä.

Biopolttoaineet ovat biohajoavia päinvastoin kuin fossiiliset polttoaineet, mikä pienentää biopolttoaineiden vuotoon liittyviä ympäristöriskejä. Esimerkiksi DME hajoaa EMSA:n (2023a, 48) mukaan avovedessä niin nopeasti, että öljynkeräämistöimisiä ei ehditä aloittaa. HVO:n, FAME:n ja SVO:n hajoaminen puolestaan kestää vähintään viikon. Fossiiliset öljyt eivät liukene veteen, minkä seurauksena haihtumattomat yhdisteet voivat säilyneinä säilyä vedessä pitkiäkin aikoja. Myös pyrolyysiöljy hajoaa vedessä hitaasti. HVO:n, FAME:n ja SVO:n myrkkypitoisuus on vähäinen, joten näiden vuoto veteen ei todennäköisesti aiheuta myrkytysoireita eliöstölle. Merinisäkkäiden ja -lintujen turkkien ja höyhenpeitteiden vedenhylkivyyks voi kuitenkin vähentyä, jos ne peittyvät FAME-polttoaineeseen. DME:n myrkkypitoisuus on vähäinen, ja hajoamisnopeutensa ansiosta se ei aiheuta pitkäaikaisia vaikutuksia vesieliöstölle. Vuotoalueen läheisyydessä olevat eliöt voivat kuitenkin akuutisti tukehtua DME:hen ennen sen hajoamista. Lisäksi DME voi syttyä tai räjähtää vuotopaikassa muodostaen turvallisuusrisikin aluksen henkilöstölle. Pyrolyysiöljy voi aiheuttaa myrkytysoireita vesieliöstölle, sillä se sisältää lukuisia myrkyllisiä ainesosia. (EMSA 2023a, 47–48.)

On huomattava, että polttoaineiden vuotokäyttäytymiseen voi vaikuttaa myös vuodon sijainti eli se, tapahtuuko vuoto vedenpinnan tasolla, ylä- tai alapuolella. Muita mahdollisia vuotokäyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat jääpeite ja aallokko. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun toteuttamassa *Uusiutuvien ja biopohjaisten nesteiden maa- ja vesistövahinkojen torjunta* -hankkeessa on tutkittu biopolttoaineiden vuotokäyttäytymistä eri olosuhteissa. Hankkeen loppuraportin (Halonen ym. 2022, 34–39) mukaan vuotosijainti vaikuttaa biopolttoaineiden pisaroitumiseen. Pisaroituminen puolestaan lisää todennäköisyyttä sille, että bioöljy leviää laajemmalle alueelle vedessä virtausten mukana. Aallokko puolestaan aiheutti emulgoitumista raakamäntyöljyllä, mikä vaikeutti öljyn keräämistä harjakeräimillä. Polttoaineiden vuotokäyttäytyminen vaikuttaakin siihen, millä menetelmällä öljyä kannattaa kerätä vedestä. Aiheesta on saatavil-

la tarkempaa tietoa Halonen ym. (2022) julkaisemasta loppuraportista. Raportissa kerrotaan myös öljyntorjuntamenetelmien ympäristövaikutuksista sekä torjunnassa syntyvästä öljyisen jätteen laadusta ja määrästä. Öljyvuotoriskit ja öljyntorjuntamenetelmien ympäristövaikutukset havainnollistavat sitä, miten monimutkainen kokonaisuus merenkulun energiamurros on. Polttoaineita valittaessa on kiinnitettävä huomiota moniin eri ympäristövaikutuksiin kasvihuonekaasupäästöjen ohella.

## Vaihtoehtoisten polttoaineiden muut ominaisuudet: syövyttävyyden ja toksisuus

Osa vaihtoehtoisista polttoaineista on erittäin myrkyllisiä ihmisille ja myös vesieliöstölle, mikä on syytä huomioida polttoaineen käsittelyssä ja varastoinnissa. Polttoainetta saattaa päästä ilmakehään vuotamalla tai moottorista epätäydellisessä palamisessa. Huolellisella polttoainejärjestelmän operoinnilla tämä pitäisi kuitenkin olla vältettävissä. Vuotoja ilmakehään tai veteen voi tapahtua myös bunkrauksessa tai jos alukseen syntyy runkovaurio. (EMSA 2022, 31.) Toinen tärkeä huomioitava ominaisuus on se, kuinka korrosiivinen eli syövyttävä polttoaine on moottorin ja polttoainejärjestelmän komponenteille. Korrosiivisuus muodostaa pahimmillaan esteen kyseisen polttoainevaihtoehdon käyttöönnotolle.

Ammoniakki on erittäin myrkyllinen ihmisen hengitysteihin joutuessaan, ja sille altistuminen voi aiheuttaa vakavia palovammoja ja silmävaurioita. Ammoniakin ionisoitumaton muoto ( $\text{NH}_3(\text{aq})$ ) on vesieliöstölle myrkyllinen päinvastoin kuin sen ionisoitunut muoto ( $\text{NH}_4^+(\text{aq})$ ). Ionisoitumattoman ammoniakin pitoisuus lisääntyy veden lämpötilan ja happamuuden kasvaessa. Siten meriekosysteemissä ionisoitumattoman ammoniakin pitoisuus kasvaa korkeammaksi kuin makeassa vedessä. Merieliöiden on myös todettu olevan herkempiä ammoniakille kuin makean veden eliöstön. Siksi ammoniakkivuotojen oletetaan aiheuttavan enemmän haittaa eliöstölle meriekosysteemeissä. Ammoniakkipäästöt voivat myös lisätä vesistöjen rehevöitymistä sekä vesi- ja maaekosysteemien happamoitumista. (EMSA 2022, 31–32.) Ammoniakin haasteena on myös sen korrosiivisuus (Law 2021, 17).

Metanolikin on ihmiselle myrkyllinen joutuessaan iholle, silmiin tai hengitysteihin. Metanolialtistus voi aiheuttaa muun muassa sokeutumisen. Myrkyllisyys johtuu metanolin hajoamistuotteista, jotka ovat formaldehydi ja formiaatti. (IRENA 2021, 100–115.) Metanolivuotojen ympäristöriskinä voi puolestaan olla metanolin kulkeutuminen pohjaveteen. Metanoli

on kuitenkin biohajoava, joten sen kerääntyminen maaperään tai pohjaveteen on IRENA:n (2021, 115) mukaan epätodennäköistä. Ammoniakin tavoin metanoli voi syövyttää ainakin joitain metalleja, kuten alumiinia, kuparia, sinkkiä ja titaania tai niiden seoksia, mikä asettaa uusia kestävyysvaatimuksia moottoreille ja polttoainejärjestelmille (IRENA 2021, 110).

Biopolttoaineiden myrkyllisyydestä vaikuttaa olevan saatavilla tietoa vain melko hajanaisesti. Esimerkiksi ICCT toteaa vuoden 2020 raportissaan, ettei HVO:n, FAME:n eikä FT-dieselin myrkyllisyydestä tai muista turvallisuusriskeistä ollut saatavilla tietoa (ICCT 2020, 15). Vaikuttaa kuitenkin siltä, etteivät biopolttoaineet aiheuttaisi ainakaan enempää myrkytysriskejä kuin merenkulun fossiiliset polttoaineetkaan: Ampah (2021, 7) ja European Biofuels Technology Platform (2011) mukaan HVO ja FAME eivät ole akuutisti myrkyllisiä ihmisille. Zivkovic (2017, 234) mukaan biodiesel on vähemmän myrkyllistä kuin tieliikenteessä käytettävä dieselpolttoaine. Tämä antaa viitteitä siitä, ettei biodiesel olisi sen myrkyllisempää kuin merenkulun dieselpolttoaineetkaan. EMSA (2023b, 31) olettaa FT-dieselin myrkytysvaikutusten olevan samankaltaisia kuin fossiilisen dieselin myrkytysvaikutusten. Bengtsson ym. (2012, 453) puolestaan toteavat fossiilisen merenkulun dieselin olevan akuutisti myrkyllisempää vesieliöille kuin biodieselin.

Biopolttoaineet ovat keskimäärin happamampia kuin merenkulun fossiiliset polttoaineet. Siksi ne syövyttävät polttoainejärjestelmiä helpommin. Biopolttoaineissa saattaa myös olla epäpuhtauksia, jotka voivat aiheuttaa vahinkoa moottorille. (Kesime 2019, 6, 13.)

## Kooste merenkulun vaihtoehtoisten polttoainetyyppien suotuisista ja epäsuotuisista ominaisuuksista

Perinteisillä fossiilisilla polttoaineilla on monia suotuisia ominaisuuksia merenkulun kannalta: niillä on korkea energiatiheys, ne ovat suhteellisen edullisia ja ne soveltuvat nykyisiin merimoottoreihin. Siksi fossiilisten polttoaineiden korvaaminen merenkulussa vähäpäästöisemmällä energianlähteillä ei ole yksinkertaista. Kullakin vaihtoehtoisella polttoaineella on omat hyötynsä ja haasteensa, kuten tästä artikkelista on käynyt ilmi. Taulukkoon 5 on koottu esimerkkejä vaihtoehtoisten polttoaineiden hyvistä ja huonoista ominaisuuksista. Kaikki taulukossa esitetyt polttoaineet ovat käytännössä rikkittäviä, jonka vuoksi rikkipäästöjä ei ole erikseen vertailtu taulukossa.

Useissa kirjallisuuslähteissä todetaan, että biopolttoaineet voivat avittaa merenkulkua vihreässä siirtymässä lyhyellä tai lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä (esim. Chountalas ym. 2023, 1; Foretich ym. 2021, 10; Gray ym. 2021, 18). Niistä monet soveltuvat sellaisenaan nykyisiin merimootoreihin tai moottoreihin, joihin on tehty vain pieniä muutoksia. Siten laivayhtiöiden ei tarvitse tehdä suuria investointeja niiden käyttöönottomiseksi. Biopolttoaineiden tuotantoprosessit ovat myös kehittyneemmät kuin e-polttoaineiden tuotantoprosessit. Yleisesti ottaen niillä on korkea energiatiheys, ja ne ovat yhteensopivia nykyisen bunkrausinfrastruktuurin kanssa (Foretich ym. 2021, 10). Biopolttoaineet on kuitenkin valmistettava ekologisesti kestävästä lähteestä, kuten jätteistä, jotta niiden käyttö ei lisäisi kasvihuonekaasupäästöjä eikä heikentäisi elinympäristöjen monimuotoisuutta. Kestävää biomassaa on tarjolla vain rajattu määrä, ja siitä tuotetuista biopolttoaineista kilpailevat useat toimialat. Muun muassa näistä syistä e-polttoaineiden käyttöönotto on välttämätöntä laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ja eliminoimiseksi.

Kirjallisuudessa on eriäviä näkemyksiä siitä, mikä vaihtoehtoisista polttoaineista toimisi parhaiten merenkulun energianlähteenä. Soveltuvuus vaihtelee myös laivareitin pituuden mukaan. Xing ym. (2021, 1) pitävät uusiutuvaa metanolia lupaavana vaihtoehtona pitkän matkan merenkulussa, kun taas vety ja ammoniakki soveltuisivat heidän mukaansa lähinnä lähimerenkulkuun. Vedyn käyttöä pitkillä merimatkoilla rajoittaa sen alhainen tiheys tilavuuden suhteen, kun taas ammoniakkin käyttöä saattaa rajoittaa sen alhainen tiheys massan suhteen. Toisaalta metanolinkin tiheys massan suhteen on alhainen, vaikkakin korkeampi kuin ammoniakkin (ks. taulukko 1 luvussa *Vaihtoehtoisten polttoaineiden fysikaaliset ja kemialliset ominaisuudet*). Kirjallisuudessa näyttää vallitsevan yhteisymmärrys vedyn rajoitteista avomerenliikenteen polttoaineena, mutta ammoniakkin suhteen tilanne on toinen. Esimerkiksi Gray ym. (2021, 19) ja EMSA (2022, 3) painottavat ammoniakkin merkitystä nimenomaan avomerenliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Myös esimerkiksi Ampah ym. (2021, 5) korostavat ammoniakkin tärkeää roolia merenkulun päästöjen vähentämisessä.

**Taulukko 5.** Vedyn, e-ammoniakin, e-metanolin, biometanolin, nesteytetyn biokaasun (LBG) ja FT-dieselin suotuisia ja epäsuotuisia ominaisuuksia (merenkulussa).

Polttoaine	Edut	Haitat
Nesteytetty vety <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Ei KHK-päästöjä</li> <li>– Ei pienhiukkaspäästöjä</li> <li>– Käytännössä NOx-päästötön</li> <li>– korkea energiatiheys massan suhteen</li> <li>– korkea lämpöarvo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– alhainen energiatiheys tilavuuden suhteen</li> <li>– varastointi vaatii kryogeeniset olosuhteet</li> <li>– soveltuu käytännössä vain polttokennoihin</li> </ul>
E-ammoniakki <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– hiiletön</li> <li>– vähäiset pienhiukkaspäästöt vrt. MGO &amp; HFO</li> <li>– korkea energiatiheys tilavuuden suhteen</li> <li>– varastointi onnistuu normaaliolosuhteissa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– ei sovellu nykyisiin polttomoottoreihin (eli vaatii erillisen moottoriratkaisun)</li> <li>– polttomoottorissa syntyvät N<sub>2</sub>O-päästöt<sup>2</sup> (voimakas KHK)</li> <li>– NOx-päästöt, mahd. jopa korkeammat kuin MGO:lla</li> <li>– myrkyllinen ihmisille ja vesieliöstölle</li> <li>– alhainen energiatiheys massan suhteen</li> </ul>
E-metanoli <sup>1</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– mahdollisuus hiili-neutraaliin tai ainakin vähähiiliseen elinkaareen (ks. viereinen sarake)</li> <li>– pienhiukkaspäästöt &lt; HFO:lla ja MGO:lla</li> <li>– korkea energiatiheys tilavuuden suhteen</li> <li>– melko haitaton vesieliöstölle<sup>6</sup></li> <li>– varastointi onnistuu normaaliolosuhteissa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– vaatii metanolille suunnitellun moottorin</li> <li>– käytössä syntyvät CO<sub>2</sub>-päästöt: vähähiilinen vain, jos tuotanto kompensoi päästöt<sup>3</sup></li> <li>– NOx-päästöt samaa tasoa HFO:n &amp; MGO:n kanssa<sup>4</sup></li> <li>– myrkyllinen ihmisille</li> <li>– alhainen energiatiheys massan suhteen</li> </ul>
Biometanoli	<ul style="list-style-type: none"> <li>– mahdollisuus hiili-neutraaliin tai ainakin vähähiiliseen elinkaareen (ks. viereinen sarake)</li> <li>– pienhiukkaspäästöt &lt; HFO:lla ja MGO:lla</li> <li>– varastointi onnistuu normaaliolosuhteissa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– vaatii metanolille suunnitellun moottorin</li> <li>– vähähiilinen elinkaari vain, jos tuotannossa suljettu hiilikierto</li> <li>– riski luonnon monimuotoisuuden heikkenemiseen: biomassan oltava ekologisesti kestävästä lähteistä</li> </ul>
Nesteytetty biokaasu (LBG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– mahdollisuus CO<sub>2</sub>-päästöttömyyteen elinkaaren aikana</li> <li>– hyvin vähäiset pienhiukkas- ja NOx-päästöt</li> <li>– korkea energiatiheys</li> <li>– soveltuu nykyisiin LNG-moottoreihin sellaisenaan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– vaatii kaasupolttoaineille suunnitellun moottorin</li> <li>– biomassan oltava ekologisesti kestävä, ml. suljettu hiilikierto (ks. biometanoli)</li> <li>– metaanivuodot</li> <li>– vaatii omat kylmäjäähdytetyt varastointitankit</li> </ul>

Polttoaine	Edut	Haitat
FT-diesel	<ul style="list-style-type: none"> <li>– mahdollisuus hiili-neutraaliin elinkaareen (ks. viereinen sarake)</li> <li>– soveltuu nykyisiin diesel-moottoreihin sellaisenaan</li> <li>– varastointi onnistuu normaaliolosuhteissa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– biomassan oltava ekologisesti kestävä, ml. suljettu hiilikierto (ks. biometanoli)</li> <li>– NOx- ja pienhiukkaspäästöistä epäselvyyttä<sup>5</sup></li> </ul>

<sup>1</sup> Oletuksena, että vety tuotettu uusiutuvalla energialla, jolloin tuotannosta ei synny kasvihuonekaasupäästöjä.

<sup>2</sup> Polttokennoissa (SOFC) ei juurikaan synny N<sub>2</sub>O-päästöjä, koska polttoaine ei reagoi hapen kanssa (ks. luku *Vaihtoehtoisten polttoaineiden muut päästöt*, kuva 2).

<sup>3</sup> E-metanolin käytönaikaisten päästöjen voidaan ajatella kompensoituvan, jos valmistuksessa tarvittava hiilidioksidi on peräisin biogeenisistä lähteistä tai ilmakehästä.

<sup>4</sup> Ei tarkkaa tietoa moottorissa syntyvistä todellisista päästöistä. Metanoli vaatii kuitenkin typenoksidipäästöjä vähentävän SCR-tekniikan, jotta kansainväliset NOx-rajat (TIERit) voidaan täyttää.

<sup>5</sup> FT-dieselin NOx-päästöt ovat kirjallisuuslähteiden mukaan joko samaa luokkaa tai vähintään 20 prosenttia MGO:n päästöjä pienemmät. Pienhiukkaspäästöt voivat kasvaa tai vähentyä MGO:n käyttöön verrattuna (ks. luku *Vaihtoehtoisten polttoaineiden muut päästöt*).

<sup>6</sup> Aakko-Saksa ym. (2023, 16).

## Yhteenveto

Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen vähähiilillä vaihtoehtoilla on välttämätöntä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Yksittäistä, kaikilta ominaisuuksiltaan suotuista, vaihtoehtoista polttoaineratkaisua merenkululle ei kuitenkaan ole. Tässä artikkelissa on käsitelty vaihtoehtoisten polttoaineiden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia, päästöjä sekä soveltuvuutta nykyisiin merimoottoreihin. Siirtymäkauden ratkaisuna välttämättömäksi muodostunevat biopolttoaineet, joista moni soveltuu nykyisiin merimoottoreihin sellaisenaan tai seokseen fossiilisten polttoaineiden kanssa. Biopolttoaineita on myös jonkin verran saatavilla merenkululle jo vuonna 2024 päinvastoin kuin e-polttoaineita, joiden kehitys on vielä kesken. Pidemmällä aikavälillä myös e-polttoaineet ovat tarpeen merenkulun päästöjen vähentämiseksi, sillä ekologisesti kestävää biomassaa ei ole saatavilla tarpeeksi kaikkien toimialojen käyttöön. Tässä artikkelissa on käynyt ilmi, että vaihtoehtoisissa polttoaineissa on syytä kiinnittää huomiota koko elinkaaren aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Vihreän siirtymän tuoksinassa ei myöskään sovi unohtaa muita ympäristövaikutuksia ilmastonmuutoksen ohella.

# 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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>.

Ampah, J.D., Yusuf, A.A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. 2021. Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. *Journal of cleaner production* 320, 128871. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>.

Bengtsson, S., Fridell, E. & Andersson, K. 2012. Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping. *Energy policy* 44, 451–463. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.030>.

Bengtsson, S.K., Fridell, E. & Andersson, K.E. 2014. Fuels for short sea shipping: a comparative assessment with focus on environmental impact. *Proceedings of the institution of mechanical engineers part M: journal of engineering for the maritime environment* 1, 44–54. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/1475090213480349>.

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: transport and environment* 52, 408–421. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.

Bureau veritas. 2023. All about methanol: your questions answered. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/magazine/all-about-methanol-your-questions-answered> [Viitattu 7.5.2024].

Chatzinikolaou, S.D. & Ventikos, N.P. 2015. Holistic framework for studying ship air emissions in a life cycle perspective. *Ocean engineering* 110, 113–122. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.042>.

*Det norske veritas [DNV].* s.a. Biofuels in Shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/maritime/publications/biofuels-in-ship-ping-white-paper-download/> [Viitattu 7.5.2024].

*Det norske veritas [DNV].* 2022. Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Harnessing-ammonia-as-ship-fuel/> [Viitattu 7.5.2024].

*Elfving, J.* 2021. Direct capture of CO<sub>2</sub> from air using amine-functionalized resin - effect of humidity in modelling and evaluation of process concepts. Lappeenrantaan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 1004. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-765-5> [Viitattu 10.6.2024].

*European biofuels technology platform.* 2011. Biofuel fact sheet. Fatty acid methyl esters (FAME). PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.etip-bioenergy.eu/images/fame-fact-sheet.pdf> [Viitattu 10.6.2024].

*European maritime safety agency [EMSA].* 2022. Potential of ammonia as fuel in shipping. PDF-dokumentti. Päivitetty versio (2023) Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html> [Viitattu 10.6.2024].

*European maritime safety agency [EMSA].* 2023a. Update on potential of biofuels in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html> [Viitattu 7.5.2024].

*European maritime safety agency [EMSA].* 2023b. Safe bunkering of biofuels. Bunkering of biofuels in maritime: characteristics, regulatory landscape, and safety assessment. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5119-safe-bunkering-of-biofuels-bunkering-of-biofuels-in-maritime-characteristics,-regulatory-landscape,-and-safety-assessment.html> [Viitattu 10.6.2024].

*Foretich, A., Zaimes, G.G., Hawkins, T.R. & Newes, E.* 2021. Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime transport research* 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.mart-ra.2021.100033>.

Halonen, J., Kettunen, M. & Myren, A. 2023. Uusimuotoisten polttoaineiden, nesteiden ja niiden raaka-aineiden vuotokäyttäytyminen. Teoksessa Halonen, J. (toim.) Uusimuotoisten polttoaineiden ja nesteiden vuotokäyttäytyminen ja kerättävyys. Uusiutuvista ja kierrätetyistä raaka-aineista valmistettujen nesteiden ja raaka-aineiden maa- ja vesistövahinkojen torjunta. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. E-kirja. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-535-2> [Viitattu 7.5.2024].

*International council on clean transportation [ICCT].* 2020. The potential of liquid biofuels in reducing ship emissions. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://theicct.org/publication/the-potential-of-liquid-biofuels-in-reducing-ship-emissions/> [Viitattu 7.5.2024].

*International maritime organization [IMO].* 2008. Resolution MEPC.177(58), adopted on 10 October 2008, Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines (NOx technical code 2008). PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177\(58\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.177(58).pdf) [Viitattu 5.6.2024].

*International maritime organization [IMO].* 2015. Third IMO GHG study 2014. Executive summary and report. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf> [Viitattu 5.6.2024].

*International maritime organization [IMO].* 2020. Fourth IMO greenhouse gas study. London: International maritime organization.

*International renewable energy agency [IRENA].* 2021. Innovation outlook: renewable methanol. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol> [Viitattu 10.6.2024].

Kesieme, U., Pazouki, K., Murphy, A. & Chrysanthou, A. 2019. Biofuel as an alternative shipping fuel: technological, environmental and economic assessment. *Sustainable energy & fuels* 4, 899–909. Saatavissa: <https://doi.org/10.1039/c8se00466h>.

Lagemann, B., Lindstad, E., Fagerholt, K., Riialand, A. & Erikstad, S.O. 2022. Optimal ship lifetime fuel and power system selection. *Transportation research part D: transport and environment* 102, 103145. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103145>.

Law, L.C., Foscoli, B., Mastorakos, E. & Evans, S. 2021. A comparison of alternative fuels for shipping in terms of lifecycle energy and cost. *Energies* 24, 8502. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en14248502>.

Maersk Mc-Kinney Møller center for zero carbon shipping. 2023. Managing emissions from ammonia-fueled vessels. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://cms.zerocarbonsshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper\\_v4.pdf](https://cms.zerocarbonsshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf) [Viitattu 5.6.2024].

Nadimi, E., Przybyła, G., Lewandowski, M.T. & Adamczyk, W. 2023. Effects of ammonia on combustion, emissions, and performance of the ammonia/diesel dual-fuel compression ignition engine. *Journal of the energy institute* 107, 101158. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.101158>.

Seddiek, I.S. & Ammar, N.R. 2023. Technical and eco-environmental analysis of blue/green ammonia-fueled RO/RO ships. *Transportation research part D: transport and environment* 114, 103547. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103547>.

Ship & Bunker. 2024. Plea for more ammonia-related emissions data. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://shipandbunker.com/news/emea/837232-plea-for-more-ammonia-related-emissions-data> [Viitattu 7.5.2024].

Työterveyslaitos s.a. Formaldehydi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ttl.fi/teemat/tyoturvaluisuus/altistuminen-tyoympariston-haittatekijoille/kemiallisten-tekijoiden-hallinta-tyopaikalla/kemikaalit-ja-tyo-altistumistietosivusto/formaldehydi> [Viitattu 5.6.2024].

U.S. environmental protection agency s.a. Emission factors for greenhouse gas inventories. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/emission-factors\\_2014.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/emission-factors_2014.pdf) [Viitattu 13.9.2024].

Wang, Y. & Wright, L.A. 2021. A comparative review of alternative fuels for the maritime sector: Economic, technology, and policy challenges for clean energy implementation. *World* 4, 456–481. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/world2040029>.

Wärtsilä s.a. Engine online configurator. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/marine/engine-configurator> [Viitattu 25.9.2024].

*Wärtsilä s.a.* Exhaust gas emissions from ships. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/exhaust-gas-emissions-from-ships> [Viitattu 13.9.2024].

*Wärtsilä.* 2022. No more mysteries about marine biofuels – your top six questions answered. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/insights/article/no-more-mysteries-about-marine-bio-fuels-your-top-six-questions-answered> [Viitattu 5.6.2024].

*Wärtsilä.* 2023. Methanol as marine fuel – is it the solution you are looking for? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/insights/article/methanol-fuel-for-thought-in-our-deep-dive-q-a> [Viitattu 7.5.2024].

*Yasin, M.H.M., Ali, M.A., Mamat, R., Yusop, A.F. & Ali, M.H.* 2019. Physical properties and chemical composition of biofuels. In Basile & Dalena (eds.) Second and third generation of feedstocks: The evolution of biofuels. London: Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815162-4.00011-2>.

*Živković, S.B., Veljković, M.V., Banković-Ilić, I.B., Krstić, I.M., Konstantinović, S.S., Ilić, S.B., Avramović, J.M., Stamenković, O.S. & Veljković, V.B.* 2017. Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. *Renewable and sustainable energy reviews* 79, 222–247. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.048>.

# MERENKULUN VAIHTOEHTOISTEN POLTTOAINEIDEN VALMISTUSPROSESSIT

Taru Tanhuanpää



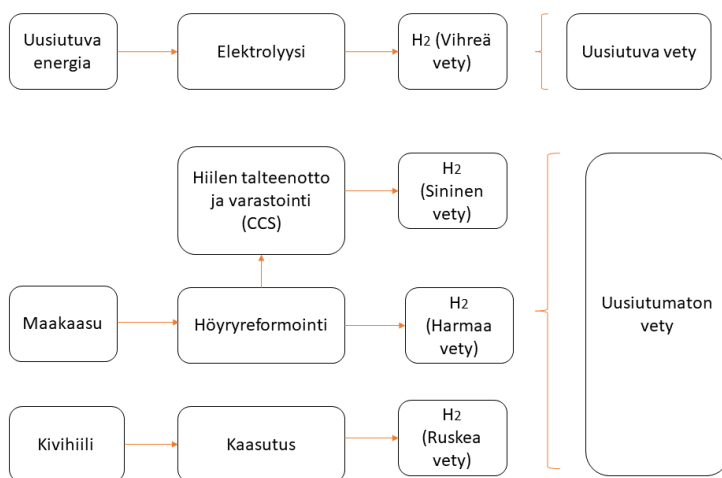
© Kymiabs / Xamk

Merenkulku nojaa vahvasti fossiilisten polttoaineiden käyttöön, mutta toimialan on vähitellen siirryttävä käyttämään vähähiilisempiä energia- muotoja kiristyvän ympäristösäätelyn myötä. Merenkulussa käytettäviä perinteisiä, fossiilisia, polttoaineita ovat raskas polttoöljy (engl. Heavy Fuel Oil eli HFO), kaasuöljy (engl. Marine Gas Oil eli MGO), dieselöljy (engl. Marine Diesel Oil eli MDO) ja nesteytetty maakaasu (engl. Liquefied Natural Gas eli LNG). Tässä artikkelissa vaihtoehtoisiksi polttoaineiksi kutsutaan muita kuin perinteisiä fossiilisia polttoaineita. Vaihtoehtoisia polttoaineita ovat esimerkiksi ammoniakki, metanoli ja biopolttoaineet. Tämä artikkeli käsittelee vaihtoehtoisten polttoaineiden valmistusprosesseja.

## Vety

Vetyä ( $H_2$ ) tarvitaan e-polttoaineiden (engl. electrofuels), kuten e-metanolin ja e-ammoniakin, valmistuksen raaka-aineena. Lisäksi vetyä voidaan käyttää sellaisenaan polttoaineena liikenteessä. Vedyn energiatiheys tilavuuteen nähden on kuitenkin alhainen, minkä vuoksi meriliikenteessä vety voi tulla kyseiseen lähinnä lyhyempien matkojen polttoainevaihtoehtona, kuten lähimerenkulussa (Xing ym. 2021, 14–15) ja sisävesiliikenteessä.

Vedyn valmistuksessa muodostuvien kasvihuonekaasu- eli KHK-päästöjen määrä riippuu tuotantotavasta. Vedylle on määritetty värikoodit riippuen tuotantotavan päästöistä. Vedyn valmistustavat ja näihin liittyvät väriluokitukset on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Käytössä olevat vedyn tuotantotavat ja tuotantotavoille määritetyt värikoodit. Värikoodit on määritetty tuotantoprossissa syntyvien päästöjen mukaan. Kivihillen ja maakaasun käyttö tuotannossa synnyttää eniten päästöjä (ruskea ja harmaa vety), joita voidaan kuitenkin vähentää hiilen talteenotolla (sininen vety). Uusiutuvan energian käyttö on hiilineutraalia (vihreä vety). Kuvan lähde: IRENA (2021, 13).

Yleisin vedyn tuotantotavoista on nykyään maakaasun höyryreformointi (Motiva 2024). Höyryreformoinnissa maakaasussa olevat ”vedyn ja hiilen väliset kemialliset sidokset rikotaan, ja hiili hapetetaan hiilidioksidiksi” (Motiva 2024). Reaktiossa syntyy siten vetyä ja hiilidioksidia (Motiva 2024). Kivihiili ja maakaasu ovat fossiilisia energianlähteitä, jonka vuoksi niiden käyttö vedyn raaka-aineena aiheuttaa paljon kasvihuonekaasupäästöjä. Kivihiilen kaasutuksesta syntyy noin 21–26 hiilidioksidiekvivalenttikiloa (kg CO<sub>2</sub> ekv.), ja maakaasun käytöstä 10–14 hiilidioksidiekvivalenttikiloa yhtä tuotettua vetykilogrammaa kohti (Kansainvälinen energiajärjestö [IEA] 2023a; IEA 2023b). Prosesseissa syntyvää hiilidioksidia voidaan kuitenkin ottaa talteen tuotantolaitoksessa ja varastoida, jolloin ilmakehään päätyvien päästöjen määrä vähenee. Kansainvälisen energiajärjestön (IEA 2023a) mukaan kivihiilen kaasutuksen päästöt voidaan vähentää jopa noin 1,4–7 hiilidioksidiekvivalenttikiloon per vetykilo, jos hiilidioksidin talteenottolaitteen talteenottotehokkuus on yli 90 prosenttia. Yhtä tehokkaalla laitteella saadaan vähennettyä maakaasun höyryreformoinnin päästöt 0,8–6 hiilidioksidiekvivalenttikiloon. Näin tehokkaita laitteita ei kuitenkaan ole vielä käytössä vedyn tuotantolaitoksissa. Jos hiilidioksidin talteenottotehokkuus on 60 prosenttia, maakaasun höyryreformoinnin päästöt ovat arviolta 5–8 hiilidioksidiekvivalenttikiloa vetykiloa kohti. (IEA 2023b.)

Vetyä voidaan valmistaa myös elektrolyysillä elektrolyysilaitteella, jossa vesi hajotetaan vedyksi ja hapeksi sähköenergian avulla. Prosessissa kuluu arviolta 55 kilowattituntia (kWh) sähköenergiaa tuotettua vetykiloa kohti. Valmistustapa on hiilineutraali, jos sähkö on peräisin uusiutuvasta energiasta. (Fortum 2020.)

Muita mahdollisia valmistustapoja ovat valosähkökemiallinen ja biogeeninen vedyn tuotanto. Valosähkökemiallisessa prosessissa vesi hajotetaan suoraan vedyksi valosähkökemiallisessa kennossa ilman elektrolyysiä. Biogeenisessä prosessissa biomassaa hajotetaan vedyksi esimerkiksi käymisreaktion avulla. Molemmat vihreän vedyn valmistustavat ovat vielä kehitysvaiheessa. (EMSA 2022, 19–20.) Siksi kuvasta 1 on jätetty pois nämä valmistustavat.

## Metanoli

Metanolia (CH<sub>3</sub>OH) voidaan valmistaa monista raaka-aineista, kuten maakaasusta, kivihiilestä ja biomassasta. Yleisimmin metanolia valmistetaan edelleen fossiilisista lähteistä prosessin edullisuuden takia.

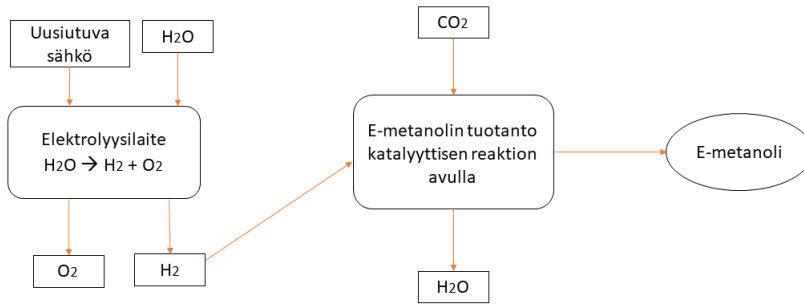
Vuonna 2021 yli 60 prosenttia metanolin tuotannosta oli peräisin maakaasun ”reformaatiosta” (nk. harmaa metanoli) ja yli 30 prosenttia kivihiilen kaasutuksesta (nk. ruskea metanoli). Fossiilisten raaka-aineiden käyttö valmistuksessa aiheuttaa paljon kasvihuonekaasupäästöjä. Siten niistä valmistettua metanolia ei voi kutsua vähähiiliseksi, ellei tuotannosta syntyvää hiilidioksidia oteta talteen, jolloin päästöt eivät päädy ilmaan. (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2021, 32–33.) EU-sääntelyssä, ja tulevaisuudessa luultavasti myös globaalissa ympäristösääntelyssä, vaaditaan vähentämään merenkulun polttoaineiden elinkaaren aikaisia päästöjä. Näihin kuuluvat myös tuotannon aikaiset päästöt (EU/2023/1805; IMO 2023, 1–16.) Tässä artikkelissa käsitellään tarkemmin vain e-metanolia ja biometanolia, koska niitä voidaan tuottaa vähäpäästöisesti ilman hiilidioksidin talteenottomenetelmiä. Esimerkiksi IRENA:n raportissa (2021, 32–33) on saatavilla tietoa siitä, miten metanolia voidaan valmistaa maakaasusta.

E-metanoli on nestemäinen polttoaine, jota valmistetaan vedystä ja hiilidioksidista. Yleisin ja tällä hetkellä käyttökelpoisin tapa valmistaa e-metanolia on esitetty kuvassa 2. E-metanolin tuotantoon tarvittava vety valmistetaan elektrolyysillä (ks. aiempi kappale *Vety*). Tämän jälkeen vedystä ja hiilidioksidista, jota voidaan ottaa talteen monista eri lähteistä, muodostetaan e-metanolia katalyyttisen reaktion avulla. Tällä menetelmällä yhden metanolitonnin tuottamiseen tarvitaan noin 1,38 tonnia hiilidioksidia ja 0,19 tonnia vetyä. Sähköä tarvitaan noin 10–11 megawattituntia, josta suurin osa kuluu vedyn elektrolyyttiseen hajottamiseen vedestä. (IRENA 2021, 42–44.)

Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen metanolin tuotantoa varten laitoksista, joissa poltetaan fossiilisia energianlähteitä. Näitä voivat olla sementin ja teräksen tuotantolaitokset sekä voimalaitokset. (IRENA 2021, 44.) IRENA (2021, 44) pitää tällä tavoin tuotettua e-metanolia vähähiilisenä, sillä ilman talteenottoa hiilidioksidi siirtyisi ilmaan tuotannon prosesseista. E-metanolin vähähiilisyys edellyttää lisäksi, että vedyn elektrolyysiin on käytetty uusiutuvaa energiaa (ks. kuva 1 vedyn tuotantotavoista ja niihin liitetyistä värikoodeista, jotka riippuvat tuotantotavasta syntyvistä KHK-päästöistä).

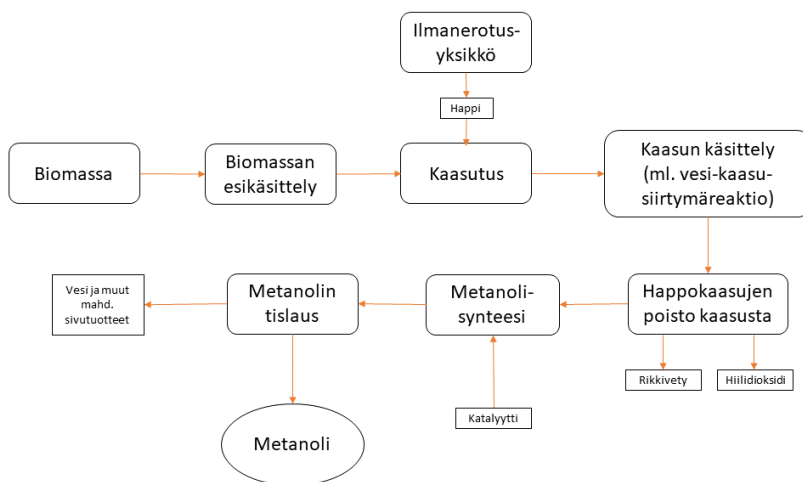
Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen myös biogeenisistä lähteistä tai suoraan ilmakehästä e-metanolin tuotantoa varten. Tällöin IRENA (2021, 44) katsoo e-metanolin olevan hiilineutraalia. Biogeenisiksi lähteiksi luokitellaan esimerkiksi kiinteän yhdyskuntajätteen poltosta syntyvä ja biomassaa polttavista sähköntuotantolaitoksista syntyvä hiilidioksidi (IRENA

2021, 44). Hiilidioksidin talteen ottaminen ilmakehästä vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta tehden prosessista hiilinegatiivisen. Menetelmän käyttö ei vielä toistaiseksi ole kustannustehokasta, sillä teknologian kehitys prosessia varten on vielä melko alkuvaiheessa (Elfving 2021, 22).



Kuva 2. E-metanolin valmistus elektrolyysin avulla. Kuvan lähde: IRENA (2021, 43).

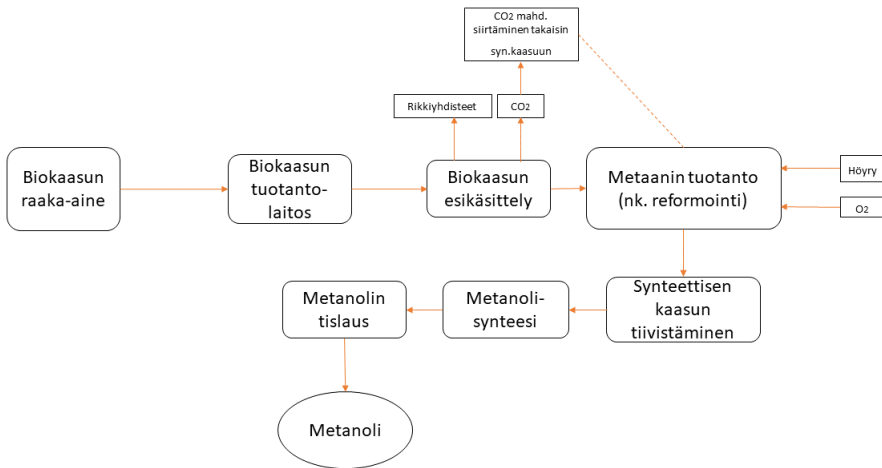
Biometanolia voidaan valmistaa biomassasta tai biokaasusta. Kuva 3 havainnollistaa biometanolin valmistusta biomassasta. Biomassan raaka-aineita ovat esimerkiksi yhdyskuntajätteet, mustalipeä ja maissintähteet. Ensin biomassa esikäsitellään, jonka jälkeen se kaasutetaan hapen avulla. Prosessissa syntynyttä kaasua käsitellään niin kutsutulla vesikaasuprosessilla (IRENA 2021, 35), jossa hiilimonoksidi eli häkä ja vesihöyry reagoivat muodostaen vetyä ja hiilidioksidia. Käsitelyn tarkoituksena on muuttaa vedyn ja hiilimonoksidin suhdetta kaasussa sopivammaksi metanolin tuotantoa varten (IRENA 2021, 35). Lisäksi kaasusta poistetaan epäpuhtauksia. Tämän jälkeen kaasusta poistetaan happokaasut ja ylimääräinen hiilidioksidi, jota ei tarvita metanolisynteessissä. Metanolisynteessissä synteettisestä kaasusta muodostetaan metanolia katalyytin avulla. Katalyytteinä voivat toimiva esimerkiksi kupari, sinkki tai alumiinioksidit. Lopuksi metanolista tislataan pois vesi ja mahdolliset muut sivutuotteet, jonka jälkeen metanoli on valmis polttoaineena käytettäväksi. (IRENA 2021, 32–33.)



Kuva 3. Metanolin valmistus biomassasta. Kuvan lähde: IRENA (2021, 35).

Kuva 4 havainnollistaa biometanolin valmistusta biokaasusta. Biokaasun tuotantolaitoksessa valmistettu biokaasu esikäsitellään metanolin tuotantoa varten. Esikäsitelyssä muun muassa poistetaan rikkiyhdisteitä ja ylimääräistä hiilidioksidia. Käsitelty biokaasu muokataan metaaniksi höyryn ja hapen avulla. Tähän synteettiseen kaasuun voidaan siirtää takaisin osa hiilidioksidista, joka on poistettu biokaasun esikäsitelyssä. Synteettinen kaasu puristetaan tiiviimmäksi, jonka jälkeen kaasusta muodostetaan metanolia synteesissä. Lopuksi raakametanoli tislataan valmiiksi metanoliksi samaan tapaan kuin valmistettaessa metanolia biomassasta. (IRENA 2021, 40–41.) Pedersen ja Schultz (2012) ovat kuvailleet tutkielmassaan metanolin valmistusta biokaasusta tässä artikkelissa esitettyä kuvausta yksityiskohtaisemmin<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Pedersen & Schultz (2012). Technical and Economic Assessment of Methanol Production from Biogas. University of Aalborg, Denmark. Department of Energy Technology. Maisterintutkielma. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://projekter.aau.dk/projekter/files/63472425/Technical\\_and\\_Economic\\_Assessment\\_of\\_Methanol\\_Production\\_from\\_Biogas.pdf](https://projekter.aau.dk/projekter/files/63472425/Technical_and_Economic_Assessment_of_Methanol_Production_from_Biogas.pdf) [Viitattu 9.1.2024].



Kuva 4. Metanolin valmistus biokaasusta. Kuvan lähde: IRENA (2021, 41).

## Ammoniakki

Ammoniakin ( $\text{NH}_3$ ) valmistuksessa tarvitaan vetyä (H) ja typpeä (N). Vedyn valmistuksen raaka-aineena voidaan käyttää maakaasua tai kivihiiltä, tai vetyä voidaan valmistaa elektrolyysillä sähköenergian avulla (ks. luku Vety). Kuva 5 esittää ammoniakin valmistusta maakaasusta. Ensinnäkin maakaasun sisältämä metaani höyrytetään niin kutsutussa reformointiyksikössä (engl. reformer). Reaktiossa vedestä ja metaanista syntyy häkää eli hiilimonoksidia (CO) ja vetyä (H) kaavan (1) mukaisesti. (Liu ym. 2020, 5–6.)

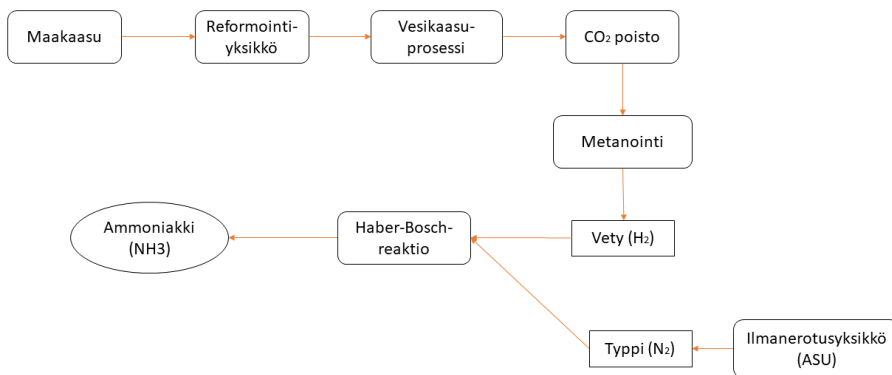


Vesikaasuprosessissa kaasun sisältämästä hiilimonoksidista ja vesihöyrystä muodostetaan hiilidioksidia ja vetyä kaavan (2) mukaisesti. Prosessin tarkoitus on tuottaa lisää vetyä. (Liu ym. 2020, 5–6; Ochoa 2023, 22–23.)



Reaktiossa 2 sivutuotteena syntyvä hiilidioksidi poistetaan tyypillisesti päästämällä se ilmakehään, mutta hiilidioksidia voidaan myös ottaa talteen ja varastoida (Ochoa 2023, 22–23). Metanoinnissa puolestaan reaktioissa jäljelle jäänyt hiilimonoksidi muutetaan metaaniksi, jotta Haber–Bosch-prosessissa käytettävä katalyytti myrkyttyisi (Liu ym. 2020, 5). Metanoinnin jälkeen valmis vety yhdistetään typpeen, jota saa-

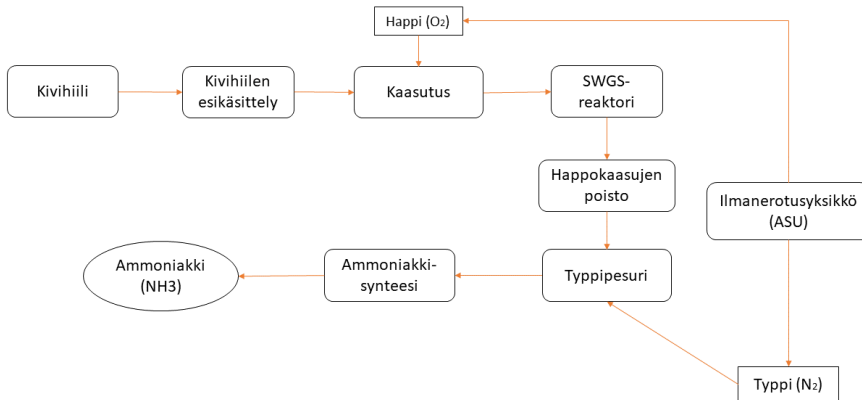
daan ilmasta ilmanerotusyksikön (engl. air separation unit eli ASU) avulla. Haber–Bosch-prosessissa vety ja typpi reagoivat rautapohjaisen katalyytin kanssa 150–250 baarin paineessa ja 400–450 celsiusasteessa muodostaen ammoniakkia. (Liu ym. 2020, 6.)



Kuva 5. Ammoniakin valmistus maakaasusta. Kuva on muokattu lähteistä Ochoa (2023, 22) ja Liu ym. (2020, 5).

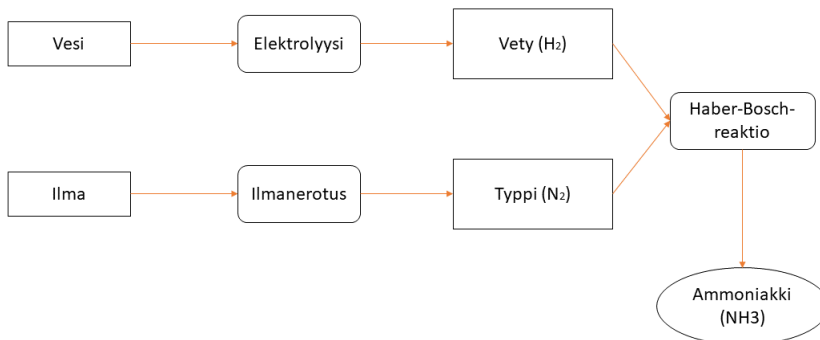
Ammoniakin valmistus kivihiilestä on esitetty kuvassa 6. Kaasutuksessa kivihiilestä valmistetaan synteettistä kaasua hapen avulla. Tämä synteettinen kaasu koostuu vedystä, hiilimonoksidista ja hiilidioksidista. Kaasusta poistetaan mahdolliset pienhiukkaset, jonka jälkeen se syötetään SWGS (sour water gas shift) -reaktoriin. Reaktio on analoginen tapahtuma edellä kuvatulle vesikaasuprosessille. Erona on, että reaktiossa käytetään rikkivetyä. Reaktiossa siis muutetaan häkä ja vesihöyry hiilidioksidiksi ja vedyksi kaavan 2 mukaisesti. (Beavis ym. 2013, 2257.)

Happokaasujen poistoyksikössä synteettisestä kaasusta poistetaan hiilidioksidi ja rikki (S). Tämän jälkeen kaasusta poistetaan hiilimonoksidi ja metaani esimerkiksi typpipesurin (engl. N<sub>2</sub> wash unit) avulla, ja pesuriin siirretään myös ilmasta erotettu typpi (N<sub>2</sub>). Synteetissä muodostuu lopulta ammoniakkia näistä raaka-aineista. (The Global Home of Chemical Engineers [AIChE] 2016.)



Kuva 6. Ammoniakin valmistus kivihiilestä. Kuva on muokattu lähteistä Ochoa (2023, 22) ja AiChE (2016).

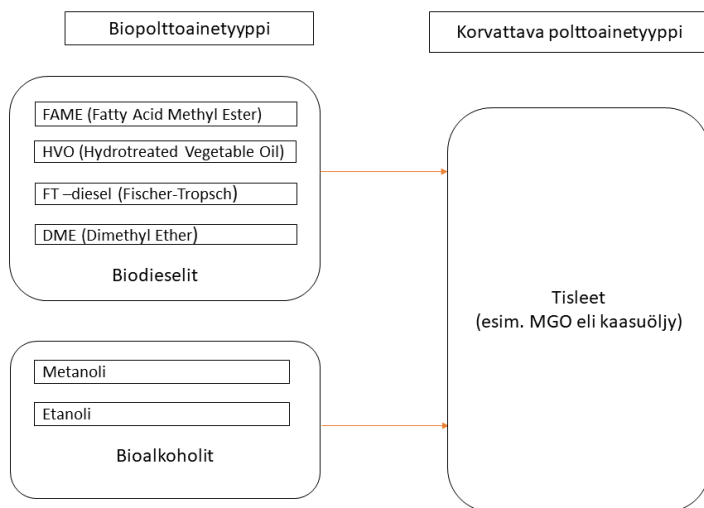
Vähähiillistä ammoniakkia voidaan tuottaa vihreästä vedystä. Tällöin elektrolyysillä valmistetusta vedystä ja ilmasta erotetusta typestä muodostetaan ammoniakkia Haber–Bosch-prosessissa (Ochoa 2023, 23–24). Tämä valmistustapa on esitetty kuvassa 7. Vedyn valmistusprosessit on kuvattu tarkemmin luvussa Vety kuvassa 1.



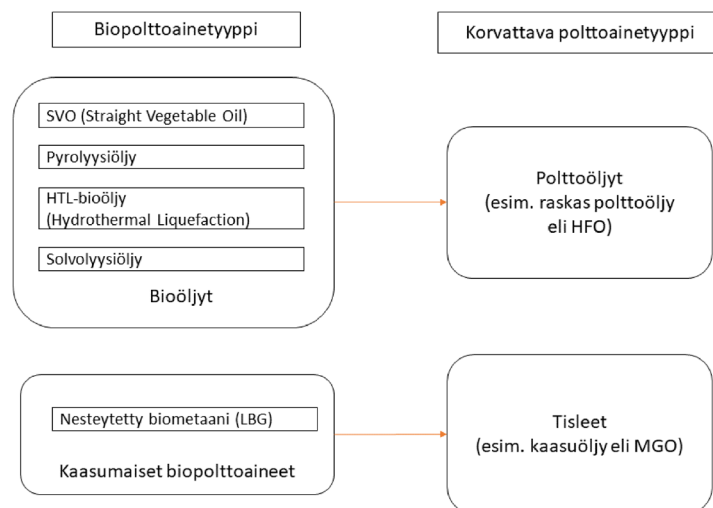
Kuva 7. Vähähiillisen ammoniakin valmistus vedystä. Lähde: Ochoa (2023, 24).

## Biopolttoaineet

Biopolttoaineita valmistetaan biologisista lähteistä, joita ovat esimerkiksi kasvipohjaiset sokerit (sugars), kasviöljyt, levät ja eläinperäiset jäterasvat (waste from animal fats) (EMSA 2023, 18). Merenkulkuun sopivat biopolttoaineet voidaan EMSA:n (2023, 18–19) mukaan jakaa neljään ryhmään: bioöljyt, biokaasut, biodieselit ja bioalkoholit. Kuvat 8 ja 9 havainnollistavat ryhmittelyä. Kuvista näkyy myös, minkä nykyisin merenkulun käytössä olevan polttoaineen kukin biopolttoaineryhmä voi korvata.



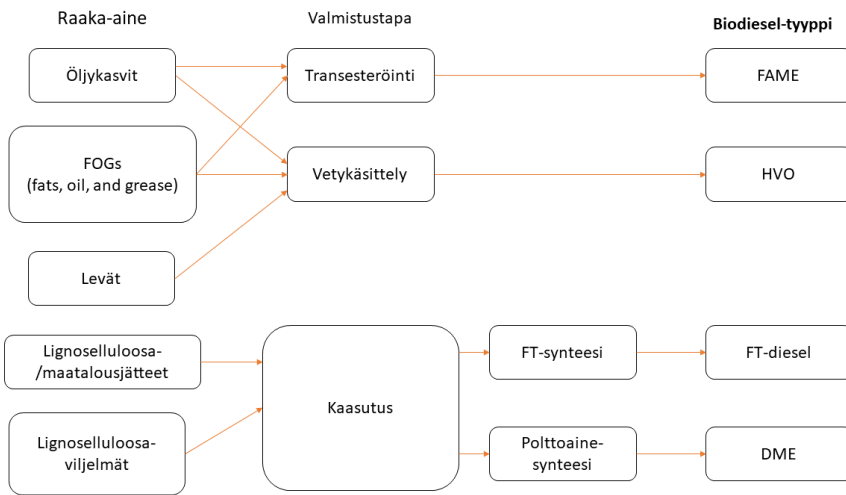
Kuva 8. Biodieseleillä ja bioalkoholeilla voidaan korvata nykyisin merenkulun käytössä olevia tislepolttoaineita, joista yleisin on MGO eli kaasuöljy.



Kuva 9. Bioöljyillä voidaan korvata nykyisten fossiilisten polttoöljyjen käyttöä, kun taas nesteytetty biokaasu voi korvata nesteytetyn maakaasun.

## Biodieselit

Biodieseleitä ovat FAME (englannin kielen sanoista Fatty Acid Methyl Ester, suom. rasvahappometyyliesteri), HVO (engl. Hydrotreated Vegetable Oil, suom. vetykäsittely kasviöljy), FT-diesel (Fischer–Tropsch) ja DME (engl. Dimethyl Ether, suom. dimetyylieetteri). Biodieseleitä valmistetaan kaasuttamalla, vetykäsittelyllä tai transesteröinnillä. (EMSA 2023, 19–20.) Kuva 10 havainnollistaa eri biodieseltyyppien valmistustapoja ja raaka-aineita, joita valmistuksessa voidaan hyödyntää.



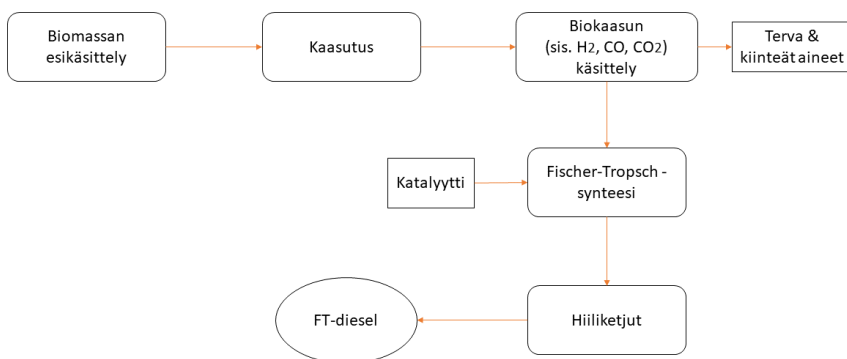
Kuva 10. Biodieseltyypit sekä niiden valmistustavat ja raaka-aineet.

FAMEa valmistetaan transesteröinnillä joko öljykasveista tai rasvajätteistä (englanninkielinen lyhenne FOGs eli fats, oil, and grease). Euroopassa valmistukseen käytetään yleisimmin rypsiöljyä, palmuöljyä ja ruokaöljyä. Maailmalla yleisiä raaka-aineita ovat soijapavut, maissi ja kookos, mutta myös eläinperäisiä rasvoja, kuten talia, käytetään. Transesteröinnissä raaka-aineen sisältämät glyseridit reagoivat metanolin tai etanolin kanssa muodostaen rasvahappoestereitä ja glyserolia. Katalyyttinä transesteröinnissä käytetään esimerkiksi kaliumia tai natriumia. Lopputuotteena syntyy raakadieseliä, joka puhdistetaan markkinoille soveltuvaksi dieseliiksi. Sivutuotteena syntyvää glyserolia voidaan hyödyntää puhdistettuna esimerkiksi ruoka- ja kosmetiikkateollisuudessa. (ETIP 2024a; EMSA 2023, 19.)

HVO:n raaka-aineena voidaan käyttää mitä tahansa kasviöljyä ja -rasvoja, jotka koostuvat triglyserideistä ja rasvahapoista. HVO:ta valmistetaan

vetykäsittelyllä, jossa raaka-ainetta, eli HVO:n tapauksessa rasvoja tai öljyjä, käsitellään vedyllä. Triglyseridit muokataan vedyn avulla rasvahapoiksi, joista muodostetaan hiilivetyjä poistamalla rasvahapoista happi joko vetenä tai hiilidioksidina. Lopuksi hiilivedyistä valmistetaan markkinoille soveltuvaa polttoainetta isomeroinnilla ja krakkauksella. (ETIP 2020.)

FT-dieselin valmistusprosessi on esitetty kuvassa 11. Ensin biomassa hajotetaan komponentteihinsa (H<sub>2</sub>, CO ja CO<sub>2</sub>) kaasuttamalla. Kaasutus tapahtuu korkeassa lämpötilassa (900 C) ja paineessa. Tämän jälkeen kaasusta poistetaan muun muassa terva ja mahdolliset kiinteät aineet. FT-synteesissä (Fischer–Tropsch) synteesikaasu reagoi katalyytin kanssa muodostaen nestemäistä hiilivetyä. (EMSA 2023, 20.)

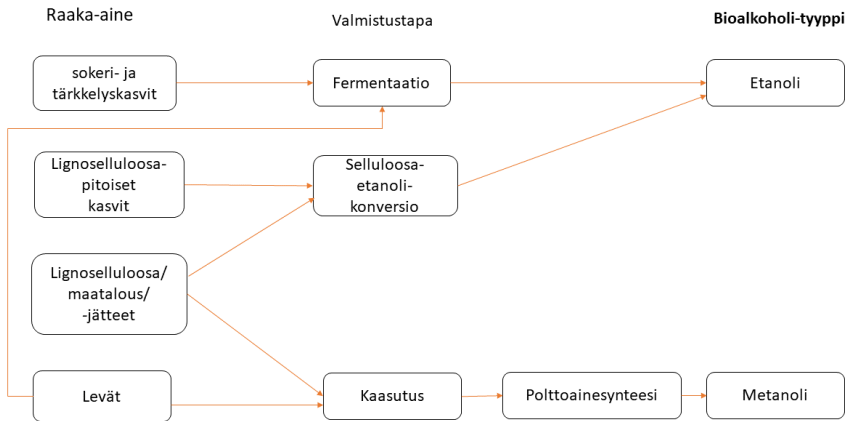


Kuva 11. FT-dieselin valmistus.

DME:tä voidaan tuottaa kuivasta ja märästä biomassasta sekä hiilestä, maakaasusta ja öljystä, jotka ovat fossiilisia raaka-aineita. Vain biomassasta tuotettu DME lasketaan biopolttoaineeksi, jonka vuoksi kuvassa 10 ei esitetä ollenkaan fossiilisia lähteitä polttoaineen raaka-aineina. DME:n valmistuksessa biomassa hajotetaan kaasuttamalla synteettiseksi kaasuksi, joka koostuu lähinnä hiilimonoksidista (CO) ja vedystä (H<sub>2</sub>). Kaasutusta seuraa katalyyttinen polttoainesynteesi, johon on kaksi tapaa. Synteettinen kaasu voidaan muuntaa ensin metanoliksi (yleensä kuparipohjaisen) katalyytin avulla. Tämän jälkeen metanolista poistetaan vesi dehydraatiossa (engl. dehydration) esimerkiksi piialumiinikatalyytin avulla, jolloin muodostuu DME:tä. Vaihtoehtoisesti metanoli voidaan muuntaa suoraan DME:ksi kaksoiskatalyysaattorissa, jossa metanolisynteesi ja vedenpoisto tapahtuvat samassa yksikössä. (EMSA 2023, 21; ETIP 2024b.)

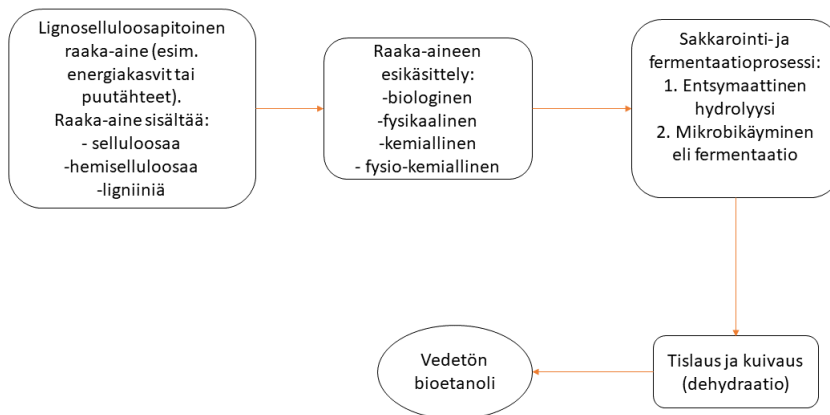
## Bioalkoholit

Bioalkoholit ovat nestemäisiä polttoaineita. Merenkulun kannalta merkittävimmät bioalkoholit ovat biometanoli ja bioetanoli, joilla voidaan korvata tislepohjaisia polttoaineita. Kuva 12 havainnollistaa näiden raaka-aineita ja valmistusmenetelmiä. Biometanolin valmistus on kuvattu tarkemmin edellä tämän artikkelin luvussa *Metanoli*.



Kuva 12. Bioalkoholeja ovat bioetanoli ja biometanoli, joita voidaan valmistaa monista eri raaka-aineista.

Bioetanolia voidaan valmistaa sokeri- ja tärkkelyskasveista sekä lignoselluloosapitoisista kasveista. Kuva 13 havainnollistaa bioetanolin valmistusta lignoselluloosapitoisista raaka-aineista. Sakkarointi- ja fermentaatioprosessissa raaka-ainetta muokataan ensin entsymaattisella hydrolyysillä. Hydrolyysissä yhdiste hajoaa vettä lisättäessä takaisin lähtöaineikseen, eli selluloosa hajoaa sokereiksi. (EMSA 2023, 22–23.) Entsymaattisessa hydrolyysissä käytetään veden lisäksi selluloosaentsyymejä, jotka fasilitoivat selluloosan hajottamista sokereiksi (Fan 2014, 141–160). Tämän jälkeen sokerit fermentoidaan etanoliksi mikrobikäymisessä. Etanoli tislataan ja kuivataan (dehydraatio), jolloin syntyy valmista etanolia. (EMSA 2023, 22–23.) Sokeripohjaisista raaka-aineista voidaan puolestaan valmistaa etanolia suoraan fermentoimalla (ks. kuva 12).



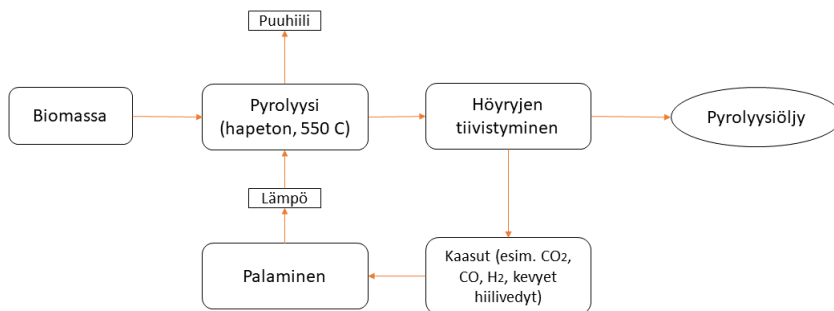
Kuva 13. Bioetanolin valmistus lignoselluloosapitoisesta raaka-aineesta.

## Bioöljyt

Bioöljyjä ovat SVO (puhdas kasviöljy, engl. straight vegetable oil), pyrolyysiöljy, HTL bioöljy (englannin kielen sanoista hydrothermal liquefaction) ja solvolyyssiöljy. Bioöljyillä voidaan korvata polttoöljyjä kuten merenkulussa tällä hetkellä yleisesti käytettävää raskasta polttoöljyä.

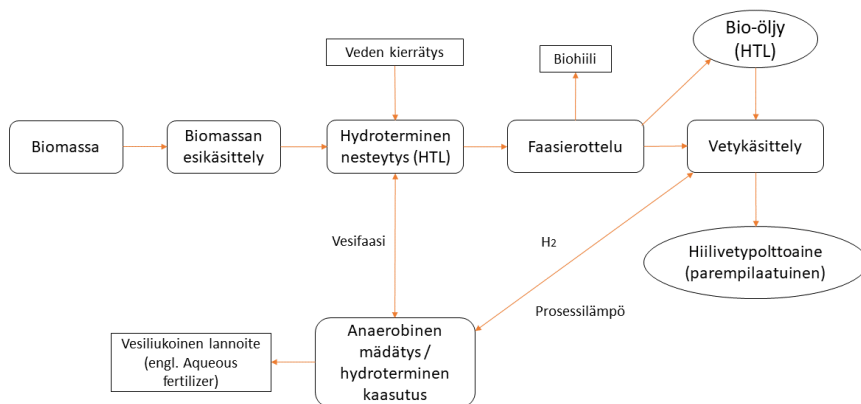
SVO:n valmistus on suoraviivainen prosessi, sillä siinä öljykasveista otetaan öljy talteen suoraan ilman välivaiheita. Tämän jälkeen öljy puhdistetaan, puristetaan ja suodatetaan valmiiksi SVO:ksi. (EMSA 2023, 24.)

Kuvassa 14 esitetään pyrolyysiöljyn valmistus. Pyrolyysissä biomassaa kuumennetaan muutaman sekunnin ajan hapettomissa oloissa, jolloin palamisen sijaan biomassaa hajoo palaviksi kaasuiksi ja puuhiileksi. Tiivistämisvaiheessa osa kaasuista tiivistyy nesteeksi muodostaen pyrolyysiöljyä. Osa pyrolyysissä muodostuvista kaasuista (esim. hiilidioksidi, häkä, vety ja kevyet hiilivedyt) on kuitenkin pysyviä, joten niitä ei voi tiivistää nesteiksi. Osa näistä kaasuista poltetaan, ja poltossa syntyvää lämpöä hyödynnetään pyrolyysiprosessissa. Syntyvän pyrolyysiöljyn osuus riippuu prosessista ja biomassasta, mutta keskimäärin se on 60–70 prosenttia. (Agricultural Research Service [USDA] 2021; EMSA 2023, 25–25.)



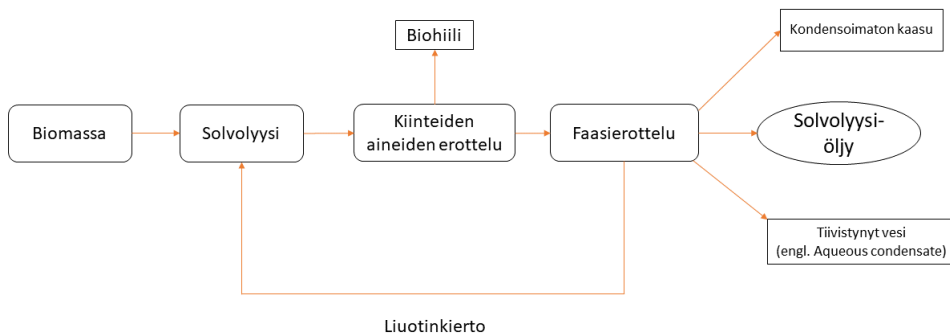
Kuva 14. Pyrolyysiöljyn valmistus.

HTL-bioöljyä valmistetaan hydrotermisellä nesteytyksellä (engl. Hydrothermal liquefaction). Kuvassa 15 esitetään HTL-bioöljyn valmistus lignoselluloosapitoisesta raaka-aineesta. Hydrotermisessä nesteytyksessä raaka-ainetta käsitellään noin 350 celsiusasteen lämpötilassa ja 150 baarin paineessa noin 15 minuutin ajan. Faasierottelu tapahtuu itsestään näissä olosuhteissa, jolloin syntyy bioöljyä, kaasuvirtaa ( $\text{CO}_2$ ), biohiiltä ja vesifaaseja. Vesifaasia voidaan kierrättää hyödyntämällä sitä uudelleen HTL-prosessissa, kun taas prosessissa syntyvästä kaasuvirrasta voidaan muodostaa metaani- tai vetytippoista synteettistä kaasua mädättämällä tai katalyyttisellä hydrotermisellä kaasutuksella. Faasierottelussa syntyvää biohiiltä voidaan käyttää sellaisenaan esimerkiksi lannoitteena. HTL-bioöljy soveltuu sellaisenaan huonosti nykyisiin laivojen moottoreihin, mutta sitä voidaan käyttää seoksissa residuaalipolttoainesten kanssa. HTL-bioöljyä voidaan myös jatkojalostaa vetykäsittelyllä, jolloin saadaan aikaan biopolttoaine, joka soveltuu sellaisenaan MGO- ja MDO-moottoreihin (kuvassa 15 nimeltään hiilivetypolttoaine). HTL-bioöljyä voidaan valmistaa myös levästä melko samalla tavalla kuin lignoselluloosasta. (EMSA 2023, 26–27; Gollakota ym. 2018). Tämä prosessi on esitetty artikkeleissa Gollakota ym. (2018) ja Biller & Ross (2016).



Kuva 15. HTL-bioöljyn valmistus.

Solvolyysiöljyn tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 16. Solvolyysi on terminen prosessi, jossa biomassa nesteytetään bioöljyksi, ja sivutuotteena syntyy biohiiltä. Prosessi on samankaltainen kuin hydroterminen nesteytys, mutta siinä käytetään superkriittistä orgaanista liuotinta paineistettuna 300–450 celsiusasteen lämpötilassa. (EMSA 2023b, 27–28.)

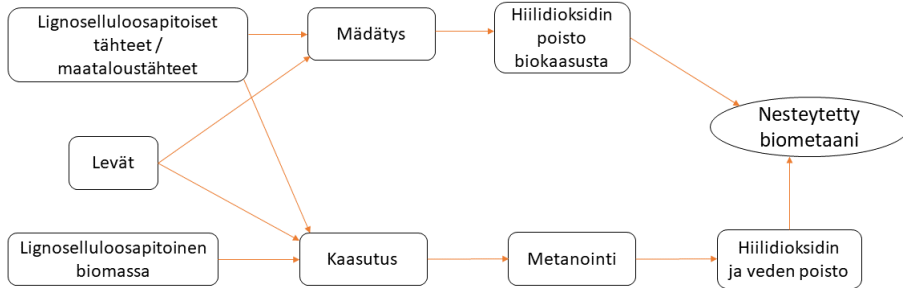


Kuva 16. Solvolyysiöljyn valmistus.

## Biokaasut

Biometaani on kaasumainen polttoaine, jota voidaan valmistaa biomassasta mädättämällä tai kaasuttamalla (ks. kuva 17). Mädätys on hapeton prosessi, jossa bakteerit mädättävät märkää biomassaa biokaasuksi, joka koostuu pääosin metaanista ( $\text{CH}_4$ ) ja hiilidioksidista ( $\text{CO}_2$ ). Tämän jälkeen biokaasusta muodostetaan biometaania poistamalla siitä hiilidioksidi. Prosessissa syntyvässä biokaasussa metaanipitoisuus on yleensä yli 80 prosenttia. Joissain reaktoreissa metaania voi karata tuotantoprosessin aikana. (EMSA 2023, 27–28.)

Kaasutus on tehokkaampi prosessi kuin mädätys, mutta prosessin kehittäminen ei ole edennyt yhtä pitkälle. Kaasutuksessa biomassasta muodostetaan synteetikaasua. Metanoinnissa (ks. kuva 17) kaasun sisältämät vety, hiilimonoksidi ja hiilidioksidi reagoivat keskenään 300–400 celsiusasteen lämpötilassa muodostaen metaania. Jäljelle jää myös vettä ja hiilidioksidia, jotka poistetaan lopuksi, jolloin syntyy valmista biometaania. (EMSA 2023, 27–28.)



Kuva 17. Nesteytetyn biometaanin valmistus.

## Yhteenveto

Merenkulku nojaa vielä vuonna 2024 vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin. Kiristyvän ympäristösääntelyn myötä alalla on kuitenkin siirryttävä vähitellen fossiilittomien, vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavien, polttoaineiden käyttöön. Fossiilisten polttoaineiden käytössä suurin osa kasvihuonekaasupäästöistä syntyy, kun fossiilisia polttoaineita poltetaan moottorissa. Sen sijaan vaihtoehtoisilla polttoaineilla tuotannon aikaiset päästöt ovat ratkaisevassa asemassa. Siksi niiden ympäristökestävyyttä arvioitaessa onkin tarkasteltava koko elinkaaren aikaisia päästöjä. Esimerkiksi ammoniakkia ja metanolia voidaan valmistaa niin fossiilisista lähteistä kuin vihreästä vedystä eli uusiutuvalla energialla tuotetusta vedystä. Biopolttoaineissa oleellinen kysymys on, onko valmistukseen käytetty biomassaa peräisin ekologisesti kestävästä lähteestä. Tässä artikkelissa on esitetty merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden valmistusprosesseja.

# LÄHTEET

*Agricultural research service [USDA] – U.S. department of agriculture.* 2021. What is pyrolysis? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/wyndmoor-pa/eastern-regional-research-center/docs/biomass-pyrolysis-research-1/what-is-pyrolysis/> [Viitattu 21.3.2024].

*AIChE – The global home of chemical engineers.* 2016. Introduction to ammonia production. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2016/september/introduction-ammonia-production> [Viitattu 21.3.2024].

*Beavis, R., Forsyth, J., Roberts, E., Song, B., Combes, G., Abbott, J., Mcleod, N., Vass, E., Davies, M. & Barton, I.* 2013. A step-change sour shift process for improving the efficiency of IGCC with CCS. *Energy procedia* 37, 2256–2264. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.106>.

*Biller, P. & Ross, A.B.* 2016. Production of biofuels via hydrothermal conversion. In Luque, Lin, Wilson & Clark (eds.) *Handbook of biofuels production* (pp. 509–547). Sawston: Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100455-5.00017-5>.

*European maritime safety agency [EMSA].* 2022. Potential of ammonia as fuel in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html> [Viitattu 21.3.2024].

*European maritime safety agency [EMSA].* 2023. Update on potential of biofuels in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/4834-update-on-potential-of-biofuels-for-shipping.html> [Viitattu 21.3.2024].

*European technology and innovation platform [ETIP].* 2020. Hydrogenated vegetable oil (HVO). Bioenergy fact sheet. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP\\_B\\_Factsheet\\_HVO\\_feb2020.pdf](https://www.etipbioenergy.eu/images/ETIP_B_Factsheet_HVO_feb2020.pdf).

*European technology and innovation platform [ETIP].* 2024a. Fatty acid methyl esters (FAME) fact sheet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.etipbioenergy.eu/fact-sheets/fatty-acid-methyl-esters-fame-fact-sheet> [Viitattu 21.3.2024].

*European technology and innovation platform [ETIP].* 2024b. Dimethyl ether (DME) fact sheet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.etipbioenergy.eu/fact-sheets/dimethyl-ether-dme-fact-sheet> [Viitattu 21.3.2024].

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/1805.*

*Fan, Z.* 2014. Consolidated bioprocessing for ethanol production. In Qureshi, Hodge, Alain & Vertès (eds.) Biorefineries. London: Elsevier. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59498-3.00007-5>.

*Fortum.* 2020. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/fort-hedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin> [Viitattu 21.3.2024].

*Gollakota, A.R.K., Kishore, N. & Gu, S.* 2018. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and sustainable energy reviews* 81, 1378–1392. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.178>.

*International maritime organization [IMO].* 2023. Revised IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships, resolution MEPC.377(80), annex 1. London: International maritime organization. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf> [Viitattu 21.3.2024].

*International renewable energy agency [IRENA].* 2021. Innovation outlook: Renewable methanol. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol> [Viitattu 21.3.2024].

*International energy agency [IEA].* 2023a. Comparison of the emissions intensity of different hydrogen production routes, 2021. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparison-of-the-emissions-intensity-of-different-hydrogen-production-routes-2021> [Viitattu 23.2.2024].

*International energy agency [IEA]. 2023b. Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity. Executive summary. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity/executive-summary> [Viitattu 23.2.2024].*

*Liu, X., Elgowainy, A. & Wang, M. 2020. Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green chemistry* 17, 5751–5761. <https://doi.org/10.1039/D0GC02301A>.*

*Motiva. 2024. Vety. WWW-dokumentti. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava\\_liikenne\\_ja\\_liikkuminen/valitse\\_auto\\_viisaasti/energiالاhteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/energiالاhteet/vety) [Viitattu 23.2.2024].*

*Ochoa, N. 2023. Comparative life cycle assessment of ammonia production pathways. Aalto-yliopisto. Insinöörityöiden korkeakoulu. Pro gradu -tutkielma. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/dfa87959-6a9a-43dd-bdf3-246728bee9d7/content> [Viitattu 21.3.2024].*

*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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126651>.*

# MERENKULUN VAIHTOEHTOISTEN POLTTOAINEIDEN HINTOJEN KEHITYS

Taru Tanhuanpää



© Elias Altarriba

Merenkulku nojaa toistaiseksi vahvasti fossiilisiin polttoaineisiin. Tämä johtuu fossiilisten polttoaineiden edullisuudesta, hyvästä saatavuudesta, korkeasta energiatihydestä ja muista suotuisista ominaisuuksista. Kiristytvä merenkulun ympäristösääntely kuitenkin ohjaa toimialaa siirtymään vähitellen vähähiilisiin energianlähteisiin. Ympäristösääntelyn päätaavoitteena on vähentää toimialan kasvihuonekaasupäästöjä.

Vuonna 2023 yleisimmin käytettyjä merenkulun fossiilisia polttoaineita ovat öljypohjaiset polttoaineet, kuten raskas polttoöljy (engl. heavy fuel oil eli HFO) ja kaasuöljy (engl. marine gas oil eli MGO). Raskas polttoöljy on niin kutsuttu residuaali- eli jäännöspolttoaine, jota syntyy raakaöljyn jalostamisen sivutuotteena. Koska residuaalipolttoöljy on jalostamolle jätettä, se on halvin merenkulun polttoaineista. Kaasuöljy (MGO) on raakaöljyn tisleistä valmistettava merenkulun polttoaine, joka on HFO:ta kalliimpaa jalostusprosessin kustannusten ja globaalisti tarkasteltuna suuremman kysynnän vuoksi.

Itämeren laivaliikenteessä on viime vuosina yleistynyt nesteytetyn maakaasun eli LNG:n (engl. liquefied natural gas) käyttö. Globaalisti LNG:n osuus merenkulun polttoaineiden kysynnästä on kuitenkin vähäinen (Zincir 2022, 18148–18149). LNG on fossiilinen, muttei öljypohjainen polttoaine. Vuonna 2021 käytännössä kaikki laivat (99,9 %), joiden bruttovetoisuus on yli 5000, käyttivät edellä mainittuja polttoaineita (Det Norske Veritas (DNV) 2023b, 39).

Vaihtoehtoisia merenkulun polttoaineita ovat esimerkiksi biopohjaiset polttoaineet eli bioöljyt ja -kaasut. Niitä voidaan valmistaa ruokakasveista, selluloosasta, jätteistä ja tähteistä (DNV 2023a, 10). Dieselin kaltaisia biopolttoaineita ovat esimerkiksi HVO ja FAME (englanniksi hydrotreated vegetable oil ja fatty acid dimethyl ester) (Solakivi ym. 2022, 3). HVO valmistetaan vetykäsitellyistä kasviöljyistä ja FAME eläin- tai kasviöljyistä. Valmistuksessa käytetyt öljyt voivat olla myös jäte- ja tähderaaka-aineita. (Mittelbach 2015, 1832.) Näitä voidaan käyttää useimmissa nykyisissä laivojen moottoreissa suoraan tai tekemällä vähäisiä muutoksia moottoriin.

Biomassasta voidaan valmistaa myös nesteytettyä kaasua (LBG, joskus myös bio-LNG), biometanolia ja bio-dimetyylieetteriä (bio-DME), joiden käyttäminen vaatii jonkin verran suurempia muutoksia laivojen nykyisiin, öljypohjaisilla polttoaineilla toimiviin, moottoreihin. (Solakivi ym. 2022, 3.) Nesteytettyä biokaasua voidaan kuitenkin käyttää suoraan nykyisissä LNG:illä toimivissa moottoreissa.

Vaihtoehtoihin merenkulun energianlähteisiin kuuluvat myös synteettiset polttoaineet, kuten metanoli, ammoniakki ja synteettinen metaani. Synteettisiä polttoaineita voidaan valmistaa biomassasta tai fossiilipohjaisista raaka-aineista kaasuttamalla. (Solakivi ym. 2022, 4.) Esimerkiksi maakaasusta voidaan valmistaa fossiilipohjaista ammoniakkaa ja metanolia (European Maritime Safety Agency [EMSA] 2022, 16; Solakivi ym. 2022, 6–7), mutta fossiilisten energianlähteiden käyttö tuotannossa aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Siten maakaasusta tuotettuja synteettisiä polttoaineita ei voi kutsua vähähiiliseksi.

Myös e-polttoaineet (englanniksi electrofuels) ovat synteettisiä, mutta niiden valmistuksessa käytetään vetyä. Yleisin tapa vedyn tuotantoon on elektrolyysi, jossa vesi hajotetaan sähköenergian avulla vety- ja happimolekyyleiksi (Brynnolf ym. 2018, 8). Lisäksi e-ammoniakin tuotannossa käytetään ilmakehästä saatavaa typpeä (EMSA 2022, 16). E-metanolin valmistukseen tarvitaan hiilidioksidia, jota voidaan ottaa talteen esimerkiksi teollisuuden prosesseista (IRENA 79–81). Merenkulun vaihtoehtois-

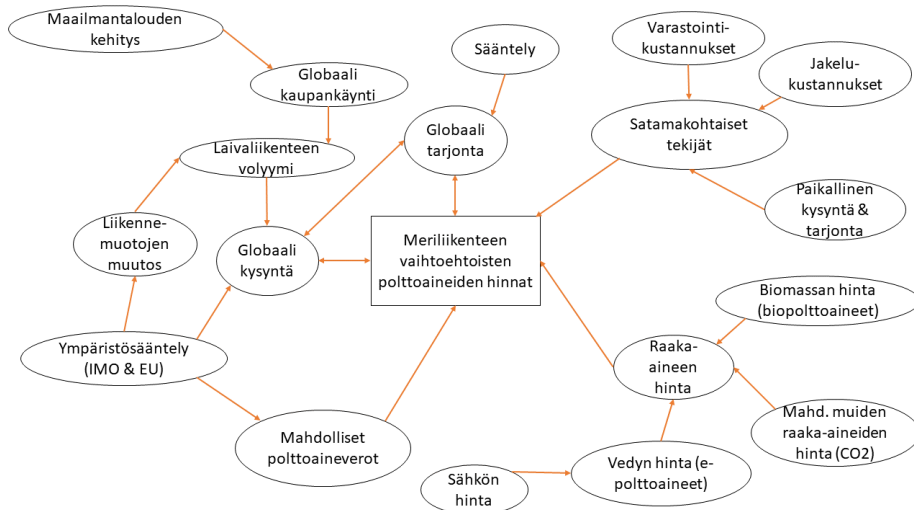
ten polttoaineiden valmistusprosesseja on kuvattu tarkemmin tämän artikkelikokoelman luvussa *Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden valmistusprosessit*.

Vuonna 2023 vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotanto on vasta käynnistymässä, ja vähäisen tuotannon takia polttoaineet ovat tällä hetkellä hyvin kalliita verrattuna öljypohjaisiin polttoaineisiin ja nesteytettyyn maakaasuun. Investointeja tälle sektorille odotetaan kuitenkin tulevaisuudessa paljon, minkä oletetaan johtavan vaihtoehtoisten polttoaineiden hintojen laskemiseen. Hintaeron kurominen fossiilisiin polttoaineisiin nähden on edellytys vaihtoehtoisten polttoaineiden yleistymiselle merenkulussa, sillä polttoainekustannukset ovat laivayhtiöille huomattava kuluerä.

Tässä artikkelissa pohditaan merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden mahdollista hintakehitystä. Artikkelissa käsitellään hintoihin vaikuttavia tekijöitä ja esitellään kirjallisuusestimaatteja polttoaineiden tulevaisuuden hinnoille. Koska vakiintuneita markkinoita vaihtoehtoisten polttoaineille ei vielä artikkelin kirjoitushetkellä (vuonna 2024) ole laivaliikenteessä, useimmat kirjallisuudessa esitetyt hinta-arviot perustuvat arvioihin polttoaineiden tuotantokustannuksista. Tuotantokustannukset asettavat tietyt raamit markkinahinnoille, mutta on huomattava, että lopulta kysynnän ja tarjonnan suhde pitkälti määrittää markkinahinnan. Artikkelissa pohditaankin myös merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden kysynnän ja tarjonnan mahdollista kehittymistä.

## **Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin vaikuttavat tekijät**

Polttoaineiden hintojen kehitys riippuu monista tekijöistä, joita kuva 1 havainnollistaa. Det Norske Veritasin (2021, 52) mukaan polttoaineen hintaan vaikuttavat esimerkiksi raaka-aineen hinta, jakelukustannukset sekä kysynnän ja tarjonnan suhde markkinoilla, joiden kehitystä on vaikea ennakoida. Tässä luvussa käsitellään sitä, miten kuvan 1 esittämät tekijät vaikuttavat merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin.



Kuva 1. Meriliikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä. Vaihtoehtoisilla polttoaineilla tarkoitetaan muita kuin perinteisiä öljypohjaisia polttoaineita.

Raaka-aineen hinta vaikuttaa ratkaisevasti polttoaineen tuotantokustannukseen, joka vaikuttaa polttoaineen myyntihintaan. Lisäksi tuotantokustannukset riippuvat tuotantolaitosten investointikustannuksista. Raaka-aineen hinnan ja investointikustannusten osuudet kokonaistuotantokustannuksesta vaihtelevat polttoainetyypeittäin (Solakivi 2022, 7). Investointikustannusten oletetaan kuitenkin laskevan ajan myötä teknologian kehittyessä (Solakivi 2022, 7). Raaka-aineen hinta puolestaan määräytyy sen saatavuuden perusteella.

On huomattava, että polttoaineiden raaka-aineiden saatavuus vaikuttaa suoraan myös polttoaineiden tarjontaan. Kuvan 1 selkiyttämiseksi tämä riippuvuus on jätetty pois kuvasta, ja tässä luvussa käsitellään tarkemmin lähinnä raaka-aineen hinnan vaikutusta polttoaineiden tuotantokustannuksiin.

Biodieselillä ja biometanolilla raaka-aineen hinnan osuus tuotantokustannuksesta on 25–90 prosenttia Solakivi ym. (2022, 7) kirjallisuuteen perustuvan arvion mukaan. Arvion laajuus havainnollistaa sitä, miten vaikeaa tuotantokustannusten ennustaminen on. Toisaalta Korberg ym. (2021, 6) esittävät tarkempia arvioita: heidän mukaansa raaka-aineen osuus lopullisesta biopolttoaineen tuotantokustannuksesta on 35–50 prosenttia, jos raaka-aineena käytetään kuivaa biomassaa. Nesteytetylle biokaasulle ja HVO:lle osuudet ovat vastaavasti 25 prosenttia ja 65 prosenttia. HVO:lle raaka-aineen osuus hinnasta on suurin siksi, että kasviöljy on arvioissa

käytetyistä raaka-aineista kallein. (Korberg ym. 2021, 6.) Arvioita tulkittaessa on hyvä muistaa, että raaka-aineiden hinnat voivat muuttua tulevaisuudessa paljonkin verrattuna nykyisiin kirjallisuusestimaatteihin.

Biopohjaisten polttoaineiden ekologinen ja sosiaalinen kestävyys riippuvat siitä, mitä raaka-ainetta tuotannossa käytetään. Esimerkiksi yhdyskuntajätteiden, ruuantähteiden ja metsienhoidosta syntyvien jätteiden käyttäminen on ympäristöystävällistä. Sen sijaan ruokakasvien hyödyntäminen polttoaineiden tuotannossa on pois ruuantuotannosta (Solakivi ym. 2022, 4). Siksi niistä tuotettujen polttoaineiden tuotannon ei toivota yleistyvän (EU/2018/2001). Jos taas biomassan kasvatuksen tieltä kaadetaan metsää, tuotannosta syntyy hiilidioksidipäästöjä, ja metsäkato kiihtyy. Myös EU:n ja kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n ympäristösääntelyssä suositetaan kestävästi tuotettujen biopolttoaineiden käyttöä merenkulussa. Jätteiden ja muiden ympäristöystävällisten biopohjaisten raaka-aineiden saatavuus voi olla kortilla, kun näiden kysyntä lisääntyy monilla sektoreilla vihreän siirtymän myötä. Biopolttoaineiden raaka-aineiden hinnat voivat nousta nykyisestä, jos tarjonnasta on pulaa.

E-polttoaineilla vedyn hinta on merkittävä tekijä tuotantokustannusten muodostumisessa. Vedyn tuotanto elektrolyysillä vaatii valtavasti energiaa. Jotta e-polttoaineen tuotanto olisi päästötöntä, vety on tuotettava uusiutuvalla sähköenergialla, kuten tuuli- tai aurinkovoimalla. Uusiutuvalle energialla tuotettua vetyä kutsutaan vihreäksi vedyksi (Deign 2020), ja vihreällä vedyllä tuotettuja e-polttoaineita vihreiksi polttoaineiksi. Vihreän vedyn kysynnän oletetaan kasvavan nykyisestä lähes kaikilla toimialoilla vihreän siirtymän myötä (EMSA 2022, 33). Uusiutuvaan energiaan tarvitaankin huomattavia investointeja, jotta tarjonta voisi vastata kasvavaan kysyntään tulevaisuudessa. Toisaalta e-polttoaineiden tuotantokustannukset voivat vaihdella myös alueittain (Solakivi ym. 2022, 8), sillä sähkön hinta vaihtelee alueittain muun muassa saatavuuden mukaan. Esimerkiksi vuonna 2023 Suomessa oli Euroopan toiseksi halvin sähkö. Euroopassa sähkön keskiarvoinen hinta oli noin 97 €/MWh, kun Suomessa hinta oli noin 57 €/MWh. (Energiateollisuus 2024.)

E-metanolin tuotantokustannus riippuu lisäksi raaka-aineena käytettävän hiilidioksidin hinnasta (IRENA 2021, 79–82). Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen esimerkiksi sementin, teräksen, maakaasun ja biopolttoaineiden tuotantolaitoksilta. Hiilidioksidipitoisuus vaihtelee tuotantolaitoksittain, joten talteenoton hintaan vaikuttaa se, mistä hiilidioksidi on otettu talteen. (Brynolf ym. 2018, 9.) Lisäksi talteenottomenetelmä vaikuttaa hiilidioksidin hintaan.

Brynolf ym. (2018, 9) arvioivat vuonna 2018, että talteenotto sementin-tuotannosta maksaisi lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä 50–70 euroa hiilidioksiditonnia kohti (€<sub>2015</sub>). Pitkällä aikavälillä hinta laskisi heidän arvionsa mukaan 30–60 euroon (€<sub>2015</sub>) hiilidioksiditonnilta talteenottomenetelmien kehittyessä. Toisaalta maakaasuntuotannosta talteen otetun hiilidioksidin hinta lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä voisi olla alimmillaan 20 euroa (€<sub>2015</sub>) tonnilta. (Brynolf ym. 2018, 8–9.) Hiilidioksidia voidaan ottaa talteen myös ilmasta, mutta tämän prosessin kehitys on vielä melko alkuvaiheessa. Teknologian on kehityttävä, jotta menetelmää voisi hyödyntää kustannustehokkaasti. (Elfving 2021, 22.) Hiilidioksidin talteenoton hinnat tulevaisuudessa riippuvat talteenottomenetelmien kehittämisestä ja yleistymisestä.

Polttoaineen lopullista myyntihintaa nostavat polttoaineeverot. Merenkulun polttoaineet ovat toistaiseksi verottomia koko EU:n alueella. EU:ssa on kuitenkin suunniteltu minimiveroa merenkulun fossiilisille polttoaineille osana energiaverodirektiivin (EY/2003/96) uudistusta. (Euroopan komissio 2021a.) Uudistus on jumissa tällä hetkellä, sillä asiasta vaaditaan yksimielisyys jäsenmaissa (Packroff & Kurmayer 2023). Siten tätä artikkelia kirjoittaessa on mahdotonta arvioida mahdollisen veron tasoa tai sitä, milloin vero mahdollisesti tulisi käyttöön. Tämä ei kuitenkaan vaikuta vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin ainakaan lähivuosina. Mikäli fossiilisten polttoaineiden vero tulee voimaan, vaihtoehtoiset merenkulun polttoaineet pysyisivät verottomina seuraavat kymmenen vuotta. Verouudistuksen tarkoituksena on tehdä vaihtoehtoisista polttoaineista aiempaa kilpailukykyisempiä verrattuna fossiilisiin energianlähteisiin. (Euroopan komissio 2021a.) On kuitenkin mahdollista, että kun vaihtoehtoiset polttoaineet on saatu yleistymään merenkulussa, myös niiden verokohtelu muuttuu.

Kysynnän ja tarjonnan suhde on avainasemassa polttoaineiden hintojen muodostumisessa. Kysynnän ylittäessä tarjonnan hinnat nousevat, mikäli muut tekijät pysyvät samoina. Jos taas tarjonta ylittää kysynnän, hinnat laskevat muiden tekijöiden pysyessä samoina. Toisaalta polttoaineiden hinnat vaikuttavat sekä kysyntään että tarjontaan. Tätä molemminpuolista vaikutusta havainnollistetaan kuvassa 1 kaksisuuntaisilla nuolilla hinnan ja tarjonnan sekä vastaavasti hinnan ja kysynnän välillä. Tuotteen myyjillä on luonnollisesti kannustimet myydä kalliimpia tuotteita. Korkeat hinnat kuitenkin vähentävät tuotteen kysyntää, mikäli korvaavia vaihtoehtoja on tarjolla. Jos fossiiliset polttoaineet pysyvät vaihtoehtoisia polttoaineita halvempina, luo tämä taloudellisen kannustimen jatkaa fossiilisten energianlähteiden käyttöä merenkulussa siinä määrin kuin ympäristösääntely tämän mahdollistaa.

Myös kysynnän ja tarjonnan välillä on kuvassa 1 kaksisuuntainen nuoli, joka kuvastaa näiden riippuvuutta toisistaan. Euroopan komissiossa on todettu, että merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjonta on pysynyt vähäisenä, koska kysyntää ei toistaiseksi ole ollut (Euroopan komissio 2021b). Toisaalta kysyntää rajoittaa tarjonnan puute: laivoilla ei voida käyttää vaihtoehtoisia polttoaineita tai investoida niitä hyödyntävään moottoritekologiaan, jos näitä polttoaineita ei ole saatavilla. Vuonna 2023 vähähiilisten polttoaineiden tarjonta kaikilla toimialoilla on erittäin niukkaa (DNV 2023b, 41).

Det Norske Veritas (2022, 34) on identifioinut merkittävimpiä esteitä vähähiilisten polttoaineiden käyttöönotolle merenkulussa. Niitä ovat polttoaineiden korkeat hinnat ja vähäinen saatavuus sekä globaalin bunkrausinfrastruktuurin puute. Vähähiiliset polttoaineet lisäävät laivayhtiön investointikuluja, ja useimmat niistä tarvitsevat enemmän varastointitilaa laivalla kuin nykyiset fossiiliset polttoaineet. Lisäksi osalle polttoaineista ei ole vielä moottorinvalmistajien toimesta tuotteistettu soveltuvia merimoottoreita, mikä rajoittaa näiden polttoainetyyppien kysyntää. (DNV 2022, 34–39.)

Osa polttoaineista vaatii myös erityisiä toimenpiteitä turvallisuuden takaamiseksi. Esimerkiksi ammoniakki on erittäin myrkyllistä, joten sen käsittelyssä laivoilla täytyy noudattaa erityistä varovaisuutta. Tämä vaikuttaa niin vaadittuihin teknisiin ratkaisuihin, laivaväeltä edellytettävään koulutukseen ja muuhun osaamiseen kuin myös vallitsevaan toimintakulttuuriin. Polttoaineturvallisuuden kannalta kuivarahtialukset, säiliöalukset tai matkustaja-alukset muodostavat hyvin erityyppiset toimintaympäristöt. Lainsäädäntö on vielä kesken koskien esimerkiksi ammoniakin käsittelyä laivoilla polttoaineena. Joissain tapauksissa siis vaihtoehtoisten polttoaineiden kysyntää voi teknologian puutteen sijaan tai ohella rajoittaa soveltuvan lainsäädännön puute. (DNV 2022, 34–39.)

Vähähiilisten polttoaineiden kysyntään voidaan vaikuttaa sekä suoraan että väliillisesti ympäristösääntelyllä ja -politiikalla. Euroopan unionin alueella FuelEU Maritime -asetus lisää vaihtoehtoisten polttoaineiden kysyntää lähivuosikymmeninä. Asetus velvoittaa vähentämään merenkulussa käytettävien polttoaineiden kasvihuonekaasuintensiteettiä (KHK-intensiteetti) asteittain. Kasvihuonekaasuintensiteetillä tarkoitetaan sitä, paljonko energianlähteestä syntyy kasvihuonekaasupäästöjä energiayksikköä kohti. (EU/2023/1805.)

Kasvihuonekaasuintensiteettiin lasketaan FuelEU Maritime -asetuksessa polttoaineen koko elinkaaren aikaiset päästöt, joihin kuuluvat sekä tuotannosta että käytöstä syntyvät päästöt. Kasvihuonekaasuintensiteettiä tulee vähentää viitetasosta, jona käytetään EU:n merenkulun keskimääräistä kasvihuonekaasuintensiteettiä vuonna 2020. Vuonna 2025 vaadittu vähenemä on kaksi prosenttia referenssitasosta ja vuonna 2030 kuusi prosenttia. Tämän jälkeen intensiteettiraja kiristyy viiden vuoden välein siten, että vuonna 2050 vähenemän on oltava 80 prosenttia vuoden 2020 referenssitasosta. (EU/2023/1805.)

Laivayhtiöiden on helppo saavuttaa vuoden 2025 intensiteettiraja sekoittamalla biopolttoainetta fossiiliseen polttoaineeseen. Kuuden prosentin vähenemää varten biopolttoaineen osuutta on kasvatettava, mutta esimerkiksi tieliikenteessä vastaavat prosentit ovat olleet käytössä polttoaineissa jo pidempään. (EU/2023/1805.) Toisaalta kasvihuonekaasupäästöt eroavat toisistaan öljypohjaistenkin polttoaineiden välillä. Christodoulou ja Cullinane (2022, 8) arvioivat, että nestekaasun (engl. liquefied petroleum gas eli LPG) elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt olisivat 15 prosenttia HFO:ta pienemmät. Tämä tarkoittaisi sitä, että nestekaasulla voitaisiin täyttää FuelEU Maritime -asetuksen (EU/2023/1805) KHK-intensiteettiraja vuoteen 2035 asti.

Nesteytetyn maakaasun käytön aikaiset päästöt riippuvat moottorityypistä. LNG:tä polttoaineena käyttävät moottorit voivat perustua otto- tai dieselprosessiin. Otto-prosessissa metaanivuoto (englanniksi methane slip) on käytännössä aina isompi verrattuna dieselprosessissa muodostuvaan metaanipäästöön. Lisäksi nelitahtisella, matalapaineisella (engl. low pressure) ottomoottorilla metaanivuoto on suurempi kuin vastaavalla kaksitahtisella moottorilla. Tästä johtuen dieselprosessiin perustuvat hidaskäyntiset LNG-alukset täyttävät todennäköisemmin FuelEU Maritime -oletusraja-arvot vuoteen 2035 asti. Nelitahtisella, keskinopealla LNG-otomoottorilla sen sijaan KHK-intensiteettiraja ylittyy jo vuonna 2030 samoihin raja-arvoihin perustuen. Mikäli kyseisessä moottorissa käytetään nesteytettyä biokaasua (LBG), se auttaa saavuttamaan KHK-intensiteettirajat vuoteen 2040 asti. Vuoden 2045 raja puolestaan edellyttää e-LNG:hen siirtymistä useimmilla kaasumoottorityypeillä. (EU/2023/1805.)

Lisäksi merenkulku liitetään EU:n päästökauppaan vuonna 2024. Tämä tarkoittaa sitä, että laivayhtiöt joutuvat ostamaan päästöoikeuksia laivamatkojen aikana syntyneille kasvihuonekaasupäästöille. Yksi päästöoikeus antaa haltijalleen oikeuden päästää kasvihuonekaasuja ilmakehään yhden hiilidioksidiekvivalenttitonnin verran. EU:n sisäisillä matkoilla pääs-

töt lasketaan koko matkan aikana käytetystä energiasta. Kolmansien maiden ja EU-maiden välisillä matkoilla päästökauppa koskee 50:tä prosenttia matkan aikana käytetystä energiasta. (EU/2023/959.)

Koska päästöjen aiheuttamisesta tulee päästökaupan myötä maksullista, fossiilisten polttoaineiden käytöstä merenkulussa tulee aiempaa kalliimpaa. Samaan aikaan vähähiilisempien polttoaineiden käytöstä tulee suhteessa halvempaa. Päästökauppa ei silti välttämättä merkittävästi lisää vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä merenkulussa. Päästöoikeuksien hintojen kehitys määrittää sen, paljonko laivayhtiöt joutuvat maksamaan fossiilisten polttoaineiden päästöistä. Korkeat päästöoikeuksien hinnat voivat suunnata kysyntää vähäpäästöisempiin polttoaineisiin, kun taas alhaiset päästöoikeuksien hinnat suosivat pysymistä fossiilisissa polttoaineissa.

Toisaalta erot kilpailukyvyssä riippuvat myös eroista polttoaineiden myyntihinnoissa. Jos fossiiliset polttoaineet pysyvät huomattavasti vaihtoehtoisia polttoaineita halvempina, voi laivayhtiöille olla kannattavaa maksaa isommista KHK-päästöistä, vaikka päästöoikeuden hinta olisi korkea.

Kansainvälisellä merenkulkujärjestöllä IMO:lla on myös erittäin kunnianhimoinen kasvihuonekaasustrategia, jota päivitettiin Meriympäristön suojelukomitean (Marine Environment Protection Committee) MEPC 80 -kokouksessa heinäkuussa 2023 (IMO 2023). Päämääränä on, että kansainvälisen merenkulun kasvihuonekaasupäästöt vähenevät kokonaisuudessaan 20 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2008 päästöihin. Vuoden 2040 vähennystavoite on 70 prosenttia, ja vuoden 2050 tavoite on nettonollapäästöt toimialalla.

MEPC 80 -kokouksessa IMO totesi tarpeen merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen hinnoittelumekanismille (IMO 2023). Kyseessä voisi olla esimerkiksi hiilidioksidivero tai päästökauppajärjestelmä merenkulussa. Lisäksi päämääränä on velvoittaa laivayhtiöt vähentämään käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteettiä. Tämä toteutetaan pakollisella KHK-intensiteettistandardilla, jonka idea vastaa FuelEU Maritime -asetusta. Myös IMO:n standardiin kuuluisivat polttoaineen koko elinkaaren aikana syntyneet päästöt. Intensiteettistandardin ja päästöjen hinnoittelumekanismiin on tarkoitus tulla voimaan vuonna 2027. (IMO 2023.)

IMO:n ympäristösääntely lisää vähähiilisten polttoaineiden kysyntää kansainvälisesti, kun taas EU:n vastaavanlaiset toimenpiteet lisäävät näiden

kysyntää alueellisesti. Tämän artikkelin kirjoitushetkellä IMO:n päätöksistä ei ole saatavilla tarkempaa tietoa. On mahdollista, että mahdollinen kansainvälisen merenkulun päästökauppa ja KHK-intensiteettistandardi muotoutuvat samankaltaisiksi kuin EU:n päästökauppa ja FuelEU Maritime -asetus.

Ympäristöpolitiikalla voidaan vaikuttaa vaihtoehtoisten polttoaineiden kysyntään myös välillisesti laivaliikenteen volyyymilla. Kuva 1 esittää, että vaikutus tapahtuu niin kutsutun liikennemuotojen muutoksen (engl. modal shift) avulla. Esimerkiksi Euroopan unioni pyrkii korvaamaan osan kumipyöräliikenteestä laivaliikenteellä (Future-proofing European inland waterway transport, s.a.), sillä laivaliikenteen päästöt kuljetusyksikköä kohden ovat tieliikennettä pienemmät (Aunola 2019). Laivaliikenteen lisääntyminen lisää laivojen polttoaineiden kysyntää; tosin osa lisääntyneestä kysynnästä voi suuntautua myös fossiilisiin polttoaineisiin.

Toisaalta kiristynyt ympäristösääntely lisää merenkulun kustannuksia. Jos merenkulku kallistuu paljon suhteessa muihin liikennemuotoihin, voi osa laivaliikenteestä korvautua muilla liikennemuodoilla. Tällöin laivaliikenteen volyymi vähenisi, mikä vähentäisi laivojen polttoaineiden kysyntää. Tällainen liikennemuotojen muutos on mahdollinen ainakin lähimerenkulussa ja sisävesiliikenteessä, joita voidaan monesti korvata tie- ja rautatieliikenteellä. Sen sijaan kaukomerenkulkua on vaikea korvata muilla kulkumuodoilla, sillä vaihtoehtoisen kulkumuodon eli lentokoneiden rah-  
tikapasiteetti on huomattavasti pienempi kuin laivojen.

Toisaalta myös muihin liikennemuotoihin kohdistuu ympäristösääntelyä. Esimerkiksi lentoliikenteellä on oma päästökauppansa EU:n alueella ja tieliikenteelle on tulossa erillinen päästökauppajärjestelmä vuonna 2027 (Reducing emissions from aviation s.a.; EU/2023/959). Lentoliikenteen fossiilille polttoaineille kaavaillaan myös veroa (Euroopan komissio 2021a), ja tieliikenteen polttoaineiden verot ovat jo nyt monissa maissa melko korkeat. Eri kuljetusmuotojen polttoaineiden absoluuttiset hinnat ja päästöistä aiheutuvat kustannukset vaikuttavat tulevaisuudessa liikennemuotojen keskinäiseen kilpailukykyyn. Merenkulun päästökaupan vaikutuksia merenkulun kilpailukykyyn on pohdittu tarkemmin kokoomateoksen artikkelissa Tanhuanpää (2022, 38–74).

Lisäksi laivaliikenteen volyyymiin vaikuttaa globaali kaupankäynti, joka riippuu maailmantalouden kehityksestä. Maailmantalouden kehitys on monen vaikeasti ennakoitavissa olevan asian summa. Äkilliset talouskriisit voivat hyödyttää maailmankauppaa ja siten vähentää laivaliikennettä.

Toisaalta talouskasvu lisää globaalia kaupankäyntiä. Viime vuosina maailmantalouden kehityksen ennakointia ovat entisestään vaikeuttaneet ensin koronapandemia ja sitten Venäjän laajamittainen hyökkäyssota Ukrainaan. Näistä on seurannut poikkeuksellinen inflaatio ympäri maailmaa, mistä puolestaan on johtunut nopea korkotason nousu vuosina 2022–2023. Lähivuosina suurta epävarmuutta maailmantalouden kehitykseen luovat siis myös inflaation ja korkotason kehittyminen.

Niin kysyntään kuin myös vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjontaan voidaan vaikuttaa ympäristösäätelyllä. Euroopan yhteisön kansallisten varustamoyhdistysten keskusjärjestö (engl. European Community Shipowner's association, lyh. ECSA) on todennut, että laivaliikenteen polttoaineiden tarjoajille pitäisi asettaa vaatimuksia koskien vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjontaa (S&P Global 2023a). Yhdistyksen mukaan sääntely merenkulussa on toistaiseksi keskittynyt kysyntäpuoleen (S&P Global 2023a).

EU:n alueella AFIR-asetus (asetus vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönnotosta) velvoittaa TEN-T-ydinverkon merisatamat tarjoamaan kysyntää vastaavan määrän LNG:tä laivoille vuodesta 2025 alkaen (EU/2023/1804). Transport & Environment -yhdistys (2023) on kuitenkin kritisoinut sitä, että tarjontavelvoite koskee ainakin toistaiseksi vain LNG:tä, joka on fossiilinen polttoaine. AFIR-asetuksessa kuitenkin todetaan, että jäsenvaltioiden on annettava komissiolle ”yleiskuva tilanteesta, näkymistä ja suunnitelluista aloitteista vaihtoehtoisten polttoaineiden edistämiseksi” esimerkiksi merenkulussa (EU/2023/1804, 12). Näiden kansallisten toimintakehysten pohjalta komission on ”tarkasteltava uudelleen asetusta, jotta näille aloille [esimerkiksi merenkululle] voidaan asettaa täydentäviä pakollisia velvoitteita” (EU/2023/1804, 12). Tämän perusteella on mahdollista, että tulevaisuudessa AFIR-asetusta päivitetään koskemaan myös muita vaihtoehtoisia polttoaineita.

Tulevaisuudessa vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjonta voikin vaihdella satamittain, jos esimerkiksi EU:n jäsenvaltio on asettanut kansallisia velvoitteita merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjoamiseksi. Lisäksi satamilla voi olla omia vapaaehtoisia päästöjen vähentämistavoitteita, joiden toteuttamiseksi ne voivat pyrkiä tarjoamaan vaihtoehtoisia polttoaineita laivoille. Esimerkiksi Helsingin sataman Hiilineutraali satama-ohjelma tähtää siihen, että satamassa vierailevien alusten hiilidioksidipäästöt vähenisivät 25 prosenttia vuoteen 2035 mennessä. Tähän tavoitteeseen pyritään muun muassa tarjoamalla vaihtoehtoisia polttoaineita Helsingin satamissa. (Port of Helsinki s.a.)

Vaihtoehtoisten polttoaineiden satamakohtainen saatavuus riippuu paikallisesta tarjonnan ja kysynnän suhteesta. Laivaliikenteen määrä satamassa on yksi merkittävimmistä paikalliseen kysyntään vaikuttavista tekijöistä (Stefanakos & Schinas 2014, 179). Tarjonnan ja kysynnän suhde vaikuttaa puolestaan polttoaineiden satamakohtaisiin hintoihin (Besbes & Savin 2009, 7). Ainakin öljypohjaisten polttoaineiden hinnat ovat vuosien saatossa poikenneet merkittävästi toisistaan satamakohtaisesti. Toisaalta hintaerot satamien välillä voivat vaihdella jopa päivittäin riippuen polttoaineiden paikallisesta saatavuudesta. (Plum ym. 2014, 419.) Oletettavasti myös vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnat vaihtelevat satamittain tulevaisuudessa. Vaihtoehtoisten polttoaineiden paikallinen saatavuus voi vaihdella jopa öljypohjaisten polttoaineiden saatavuutta enemmän, jos tarjonnassa on suuria eroja satamien välillä.

Mitä lähempänä satamaa polttoaine tuotetaan, sitä pienemmät ovat polttoaineen jakelukustannukset, jotka muodostavat osan satamakohtaisista polttoaineiden hinnoista. Myös polttoaineen varastointikustannukset voivat vaihdella eri satamissa. Satamakohtaiset tekijät vaikuttavat polttoaineiden hintoihin huomattavasti vähemmän kuin esimerkiksi raaka-aineiden hinnat. Joka tapauksessa satamakohtaiset erot on syytä huomioida pohdittaessa polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä.

Lopuksi on todettava, että polttoaineen lopullista hintaa nostaa jakelijan määrittämä voittomarginaali. Voittomarginaalin vaikutusta hintaan ei käsitellä tässä artikkelissa, ja siksi sitä ei ole merkitty kuvaan 1 erillisenä tekijänä.

## **Hinta-arvioita merenkulun vaihtoehtoisille polttoaineille**

Tässä luvussa pohditaan, miten merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnat voisivat tulevaisuudessa kehittyä. Koska merenkulussa ei ole vakiintuneita markkinoita vaihtoehtoisille polttoaineille, dataa historiallisista ja nykyisistä myyntihinnoista ei ole juurikaan saatavilla tätä artikkelia kirjoittaessa vuonna 2023. Siksi hintojen kehitystä pohditaan tässä luvussa kirjallisuudessa esitettyjen estimaattien avulla, jotka on koottu kuvaan 2.

Tulevaisuuden hinta-arvioita merenkulun vaihtoehtoisille polttoaineille per öljytonniekivalentti (€/toe)							
Polttoaine	Arvio	DNV 2021	EMSA 2022	Hansson ym. 2019	IRENA 2021 (Sken1)	IRENA 2021 (Sken2)	Solakivi ym. 2022
e-metanoli	min	—	—	—	760	1120	1620
	max	—	—	—	1400	1990	2990
	ka	1090	—	880*	1080	1550	2305
biometanoli	min	—	—	—	610	1070	720
	max	—	—	—	1040	1880	1580
	ka	—	—	880*	830	1480	1150
e-ammoniakki	min	—	1470	—	—	—	1470
	max	—	2130	—	—	—	2210
	ka	840	1800	—	—	—	1840
HVO	min	—	—	—	—	—	610
	max	—	—	—	—	—	1440
	ka	—	—	990	—	—	1030
LBG	min	—	—	—	—	—	790
	max	—	—	—	—	—	1670
	ka	—	—	590	—	—	1230
FAME	min	—	—	—	—	—	940
	max	—	—	—	—	—	1770
	ka	—	—	—	—	—	1360

Kuva 2. Kirjallisuudesta poimittuja arvioita merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnoille tai tuotantokustannuksille. DNV (2021) arvio ulottuu vuoteen 2050, kun taas muut lähteet estimoivat hintoja vuodelle 2030. \*Hansson ym. (2019) artikkelissa puhutaan uusiutuvasta metanolista. Termissä ei määritellä, onko kyse bio- vai e-metanolista.

Kuvan 2 hinta-arvioista suurin osa on polttoaineiden tuotantokustannus-arvioita vuodelle 2030 (EMSA 2022, 142; IRENA 2021, 71, 82; Solakivi ym. 2022, 9). Tuotantokustannusarvioissa ei huomioida esimerkiksi kysynnän ja tarjonnan suhteen vaikutusta laivaliikenteen polttoaineiden hintoihin. Lisäksi IRENA:n raportissa (2021) huomautetaan, että raportin hinta-arviot ovat minimiarvioita hinnoille, sillä polttoaineiden lopullista myyntihintaa nostaa esimerkiksi polttoaineenjakelijan voittomarginaali. Hansson ym. (2019, 163) kutsuvat hinta-arvioitaan, jotka ulottuvat vuoteen 2030, indikaatiivisiksi. Hinta-arvioiden muodostamiseen on käytetty muun muassa saatavilla olevaa dataa tuotantokustannuksista. Det Norske Veritasin (2021, 52) arviot perustuvat puolestaan tuotantokustannusarvioihin, joihin on lisätty estimoitu jakelukustannus. DNV:n artikkeli ulottuu vuoteen 2050.

Kuvasta 2 näkyy, että polttoaineiden hinta-arvioiden vaihteluvälit ovat suuret. Saman kirjallisuuslähteen minimi- ja maksimihinta-arvioissa voi olla isoja eroja. Kaikissa lähteissä ei ole esitetty erikseen minimi- ja maksimihintoja, jolloin lähteen ainoa hinta-arvio on keskiarvorivillä. Myös eri lähteiden hinta-arviot eroavat merkittävästi toisistaan joissain polttoainetyypeissä. Laajat hintavälit kielivät siitä, että hintojen kehitystä on vaikea ennustaa. Tämä johtuu polttoaineiden hintoihin vaikuttavista lukuisista tekijöistä, joiden kehitystä on vaikea ennakoita. Estimaatteja tarkas-

teltaessa onkin huomattava, että niiden taustalla on monia oletuksia, jotka voivat poiketa toisistaan eri kirjallisuuslähteiden välillä. Myös Det Norske Veritasin (2023b, 6) tuoreessa merenkulun katsauksessa ennakoidaan, että vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnat voivat heilahdella tulevaisuudessa paljonkin tuotannon epävarmuuden takia. Vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä on esitelty tämän artikkelin ensimmäisen luvun kuvassa 1.

E-ammoniakin hinta-arviot vaihtelevat kuvan 2 kirjallisuuslähteissä noin 840 eurosta 2200 euroon. EMSA:n (2022) ja Solakivi ym. (2022) minimi- ja maksimiarviot ovat hyvin lähellä toisiaan. Näiden keskiarvo, noin 1800 euroa, on yli kaksinkertainen DNV:n (2021) estimaattiin nähden, vaikka DNV:n arvioon kuuluvat tuotantokustannusten lisäksi jakelukustannukset.

Uusiutuvan sähkön hinta vaikuttaa merkittävästi e-polttoaineiden hintoihin. Siten erot e-ammoniakin hinta-arvioissa saattavat johtua pitkälti erilaisista oletuksista koskien uusiutuvan sähkön saatavuutta, joka oletettavasti paranee huomattavasti vuodesta 2030 vuoteen 2050. DNV:n (2021) arvio vuodelle 2050 perustuu skenaarioon, jossa e-polttoaineiden tuotantoon on saatavilla edullista uusiutuvaa sähköä. On kuitenkin muistettava, että vuoden 2050 arvio on hyvin pitkän aikavälin hintaestimaatti, mikä lisää epävarmuutta.

Solakivi ym. (2022, 8) olettavat uusiutuvan sähkön hinnaksi 60 eur/MWh vuonna 2030. Kirjoittajat perustelevat korkeaa hintaa sillä, että vuonna 2020 sähkön hinta oli 80 euroa megawattitunnilta. 2020-luvun alkuvuosina sähkön hinnat ovat kuitenkin nousseet poikkeuksellisen paljon. Siten herää kysymys, kuinka relevantti vuoden 2020 korkea sähkön hinta on, kun estimoidaan sähkön hintoja vuoteen 2030 asti eli keskipitkälle aikavälille. Toisaalta EMSA:n hinta-arvio, joka puolestaan perustuu muihin lähteisiin<sup>1,2</sup>, e-ammoniakille on samansuuntainen. Kuvassa 2 esitettyjä e-ammoniakin hinta-arvioita tukee myös Kansainvälisen energijärjestön (International Energy Agency [IEA] 2019) samaa suuruusluokkaa oleva estimaatti, jota ei ole erikseen merkitty kuvaan. Energijärjestön estimaatti hintojen keskiarvolle on noin 1500 euroa öljykvivalenttitonna kohti.

---

<sup>1</sup> IMO. 2020. Fourth IMO GHG Study 2020, London, UK: International Maritime Organization.

<sup>2</sup> ISPT. 2019. Hychain – energy carriers and hydrogen supply chain.

E-metanolin hinta-arviot vaihtelevat vielä enemmän kuin e-ammoniakin, noin 760 eurosta (IRENA 2021, skenaario 1) lähes 3000 euroon (Solakivi ym. 2022) öljykvivalenttittomia kohti. Minimihinta on siis samansuuntainen kuin e-ammoniakille, mutta enimmäishinta-arvio on noin tuhat euroa korkeampi. Solakivi ym. (2022) estimoima keskiarvoinen hinta e-metanoliin, 2300 euroa, on noin kaksinkertainen lähes kaikkien muiden lähteiden arvioihin verrattuna. IRENA:n (2021) skenaarion 2 hinta-arvio, 1550 euroa, on lähimpänä Solakivi ym. (2022) arviota, mutta hintaero on silti noin 50 prosenttia.

Erot e-metanolin hinta-arvioissa johtuvat etenkin sähkön ja hiilidioksidin talteenoton hintoja koskevista oletuksista. IRENA:n (2021, 78) mukaan uusiutuvan sähkön hinta laskee tulevina vuosina 40 euroon megawattitunnilta. Tämä hinta on kolmasosan matalampi kuin Solakivi ym. (2021) käyttämä arvio, 60 eur/MWh, sähkön hinnalle vuonna 2030.

IRENA:n skenaarioista puolestaan nähdään, että hiilidioksidin lähde vaikuttaa merkittävästi e-metanolin hintaan. Skenaariossa 1 talteen otettu hiilidioksidi on peräisin erilaisista uusiutuviista lähteistä. Tällä voidaan tarkoittaa esimerkiksi sitä, että hiilidioksidi on otettu talteen biomassaa prosessoivista teollisuudenprosesseista. Skenaariossa 2 hiilidioksidi on otettu talteen suoraan ilmastasta, mikä kasvattaa e-metanolin tuotantokustannusta keskimäärin noin 50 prosenttia skenaariosta 1. Vaikka hiilidioksidin talteenotto on toistaiseksi kallista (IRENA 2021, 79), talteenottomenetelmät voivat kehittyä odotettua nopeammin. Tällöin hiilidioksidin talteenotto ilmastasta saattaa olla vuonna 2030 halvempaa kuin IRENA:n artikkelissa ennakoidaan.

Kuvassa 2 esitettyjen arvioiden mukaan biometanolin tuotanto on vuonna 2030 halvempaa verrattuna e-metanoliin. Yleisesti ottaen on oletettavaa, että biopolttoaineet pysyvät e-polttoaineita halvempina ainakin vuoteen 2030 asti. Tämä on loogista, sillä e-polttoaineita ei käytännössä ole saatavilla vuonna 2023. Vaikka vuosi 2030 on keskipitkän aikavälin päässä, e-polttoaineiden tuotannon kannalta aikaväli ei ole kovinkaan pitkä. Vihreän vedyn laajamittainen tuotanto vaatii valtavasti investointeja uusiutuvan sähkön tuotantoon, ja myös investoiminen vie aikansa. Esimerkiksi EMSA:n (2022, 37) mukaan vihreän ammoniakkin tuotantokapasiteetti ei riitä laajamittaiseen tuotantoon vielä vuonna 2030. Biopolttoaineita sen sijaan on jo saatavilla myös liikenteen toimialalle, vaikkakin kestävästi tuotettujen biopolttoaineiden tarjontakapasiteetti on rajallinen ainakin vielä vuonna 2023. Tulevaisuutta on kuitenkin mahdoton ennustaa: esimerkiksi DNV:n edustajan Martech 2024 -konferenssissa pitämän

esityksen mukaan ammoniakkin tuotanto riittäisi merenkululle jo vuonna 2030 (Brinks 2024).

Toisaalta korkein hinta-arvio biometanolille, 1880 euroa (IRENA 2021, skenaario 2) on lähellä e-ammoniakille arvioitujen hintojen keskiarvoa. Tämä voi olla yllättävä tulos, sillä hintaero e-polttoaineiden ja biopolttoaineen välillä voisi olla korkeampikin. Myös biometanolille hintaväli on kuitenkin laaja vaihdellen 610 eurosta 1880 euroon öljykvivalenttitonnia kohti. Lisäksi IRENA (2021, 71) esittää biometanolin hinnalle useita skenaarioita. Skenaarioissa vaihtelevat raaka-aineena käytetyn biomassan hinta sekä pääomakulujen taso. Kuvassa 2 esitetty skenaario 2 on artikkelin skenaarioista kallein, ja 1880 euroa on tämän skenaarion enimmäisarvio. Skenaario 1 on artikkelin matalin hinta-arvio biometanolille, ja ero näiden skenaarioiden enimmäishintojen välillä on peräti 1,8-kertainen. Lisäksi Solakivi ym. (2022) arvioivat e-metanolin keskiarvoisen hinnan vuonna 2030 noin kaksinkertaiseksi biometanolin hintaan nähden. Arvio puoltaa oletusta siitä, että ainakin keskipitkällä aikavälillä e-polttoaineet pysynevät biopolttoaineita kalliimpina.

Muiden biopolttoaineiden eli nesteytetyn biokaasun (LBG), HVO:n ja FAME:n hinta-arviot vaihtelevat 590 eurosta 1770 euroon öljykvivalenttitonnia kohti. Hintaväli on samaa luokkaa kuin biometanolilla. Arvioiden laajuus kuvastaa, että näillekin polttoainetyypeille hintojen ennustaminen on haastavaa. Hintojen keskiarvoista korkein on FAME-polttoaineen keskiarvo; tosin kuvan 2 lähteistä vain Solakivi ym. (2022, 9) on arvioinut FAME:lle hintoja. Nesteytetyn biokaasun ja HVO:n hintaestimaattien suuruudet riippuvat lähteestä. Hansson ym. (2019, 163) arvioivat HVO:n tuotantokustannuksen lähes 1,7 kertaa niin kalliiksi kuin LBG:n tuotantokustannuksen. Arviot perustuvat muihin kirjallisuuslähteisiin (Hansson ym. 2019, 163). Solakivi ym. (2022) mukaan puolestaan LBG:n tuotantokustannus olisi noin 1,2-kertainen HVO-polttoaineeseen nähden. Nesteytetylle biokaasulle tutkijoiden arvio perustuu muihin kirjallisuusestimaatteihin. HVO:n hinta-arvio perustuu arvioituun raaka-aineen hinnan kehitykseen sekä raaka-aineen hinnan arvioituun osuuteen koko tuotantokustannuksesta. (Solakivi ym. 2022, 6–7.)

Korberg ym. (2021, 6) mukaan raaka-aineen hinnan osuus tuotantokustannuksesta on HVO:lle 65 prosenttia ja LBG:lle 25 prosenttia. Osuudet riippuvat kuitenkin siitä, miten raaka-aineiden hinnat kehittyvät tulevaisuudessa. Lisäksi tuotantokustannukseen vaikuttavat esimerkiksi pääomakulut.

Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintaestimaatit ovat huomattavan korkeita verrattuna fossiilisten polttoaineiden hintoihin. Raskaan polttoöljyn (engl. heavy fuel oil, HFO) myyntihintojen keskiarvo oli noin 300 euroa öljykvivalenttitonniä kohti vuosina 2011–2020. Vastaavasti kaasuöljyn (engl. marine gas oil, MGO) hintojen keskiarvo oli noin 450 euroa. (DNV s.a.) Kuvassa 2 esitetyt vähimmäisarviotkin vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnoille ylittävät nämä fossiilisten polttoaineiden hintojen keskiarvot.

Toisaalta vuosina 2021–2022 laivojen polttoaineiden hinnat nousivat poikkeuksellisen paljon energiakriisin myötä. HFO:n hintojen keskiarvo oli noin 600 euroa per öljykvivalenttitonni joulukuun 2021 ja kesäkuun 2022 välisenä aikana. Samaan aikaan MGO:n hintojen keskiarvo oli peräti 1000 euroa. (www.shipandbunker.com.) HFO:n hintojen poikkeuksellisen korkea keskiarvo vastaa jo esimerkiksi Hansson ym. (2019) arviota nesteytetyn biokaasun hinnalle vuonna 2030. MGO:n hintojen keskiarvo on puolestaan lähellä Solakivi ym. (2020) arvioimaa HVO-polttoaineen hintojen keskiarvoa sekä IRENA (2021) halvimman skenaarion (skenaario 1) hintakeskiarvoa e-metanolille vuonna 2030.

On kuitenkin syytä huomata, että markkinahinnoilla on taipumus tasaantua jo muutaman vuoden kuluessa markkinashokin alkamisesta, kun hyödykkeen tarjonnan ja kysynnän suhde tasapainottuu. Jo syyskuun 2022 ja elokuun 2023 välisenä aikana HFO:n hintojen keskiarvo laski 400 euroon ja MGO:n hintojen keskiarvo 780 euroon öljykvivalenttitonniä kohden. (www.shipandbunker.com.) HFO:n hinnat laskivat siis yli 30 prosenttia ja MGO:n hinnat hieman yli 20 prosenttia edellä mainituista huippuhinnoista. Vuonna 2030 fossiilisten polttoaineiden hintoihin ei siten oletettavasti vaikuta enää 2020-luvun alkuvuosien energiakriisi.

Åström ym. (2018, Appendix) arvioivat vuoden 2030 HFO:n keskimääräiseksi hinnaksi 550 euroa öljykvivalenttitonniä kohden. Vastaava arvio MGO:lle on noin 870 euroa (Åström ym. 2018, Appendix). Siten keskipitkän aikavälin hinta-arviot ovat fossiilisille merenkulun polttoaineille keskimäärin alhaisemmat kuin merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineille. Åström ym. (2018) hinta-arvioissa ei huomioida mahdollisia tulevia fossiiliin polttoaineisiin kohdistuvia veroja eikä päästöoikeuksien hankinnasta aiheutuvia kustannuksia.

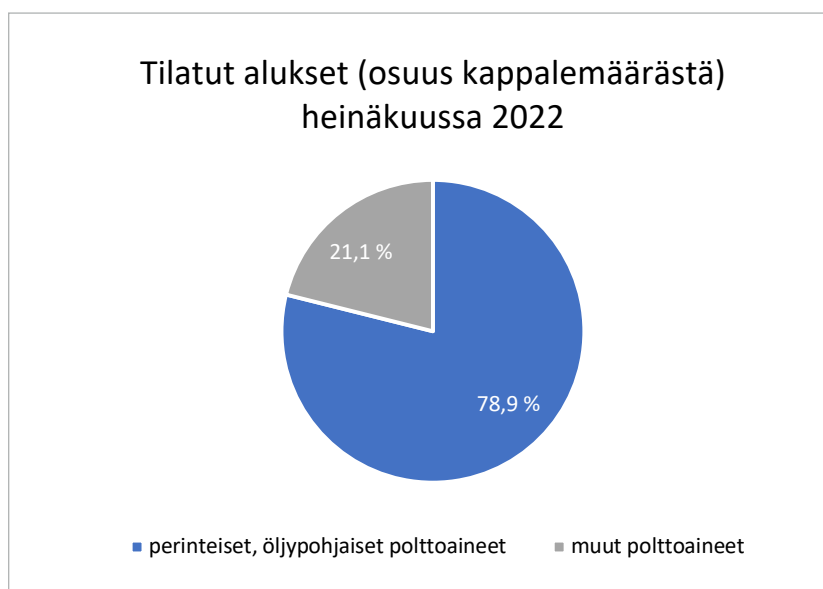
Solakivi ym. (2022, 13) ennakoivat, että raskas polttoöljy pysyy merenkulussa kilpailukykyisenä vaihtoehtoisiin polttoaineisiin nähden pitkällä aikavälillä. Tutkijoiden arviossa ovat mukana päästöoikeuksien kustan-

nukset sekä mahdollisen fossiilisiin polttoaineisiin kohdistuvan veron aiheuttama kustannus. Tutkimustulos tukee tässä artikkelissa tehtyä päätelmää siitä, ettei päästökauppa automaattisesti lisää merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden kysyntää. Tämä johtuu siitä, että fossiilisten ja vaihtoehtoisten polttoaineiden hintasuhteisiin vaikuttavat monet muut tekijät päästökaupan lisäksi.

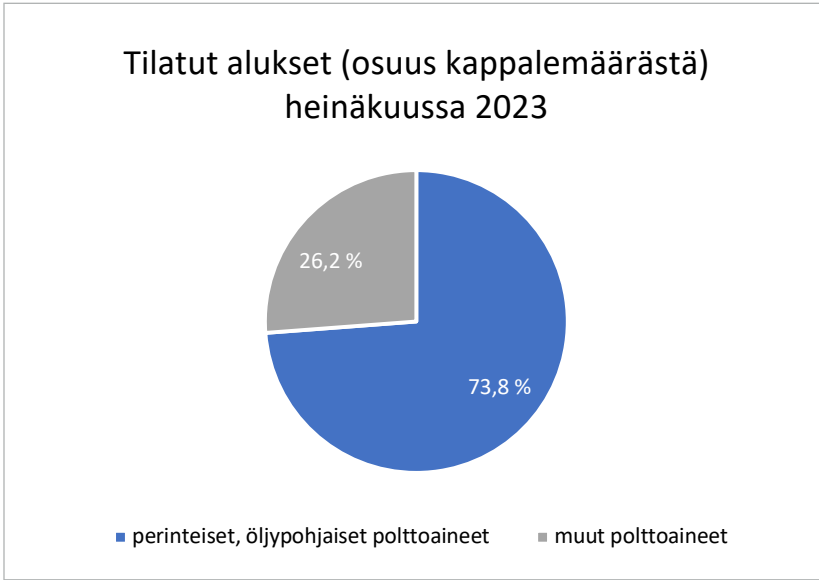
## Pohdinta

Kysynnän ja tarjonnan suhde vaikuttaa ratkaisevasti merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin. Siksi tässä luvussa pohditaan, miten kysyntä ja tarjonta voisivat mahdollisesti kehittyä tulevaisuudessa.

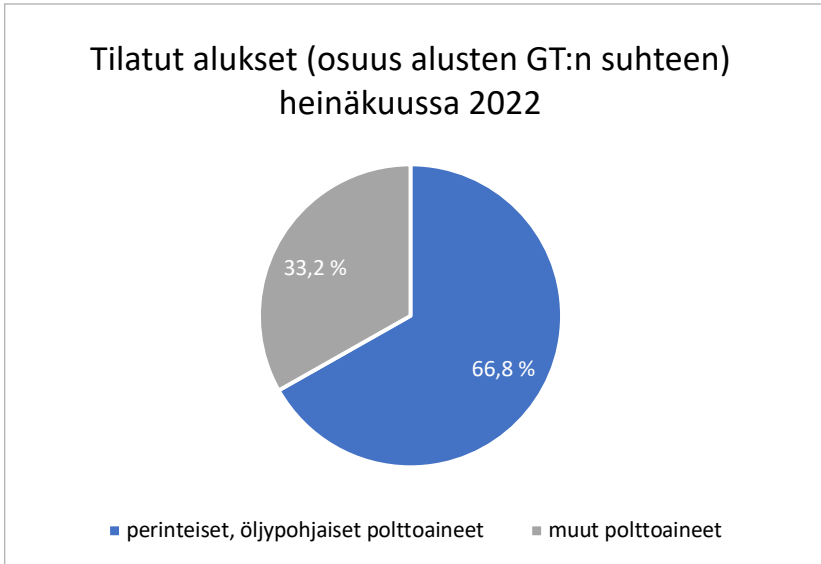
Kysynnän kehittymistä voi pohtia muun muassa sillä perusteella, millä polttoaineilla kulkevia aluksia viime vuosien aikana on tilattu. Kuvat 3–10 esittävät dataa alusten tilauskannoista vuosina 2022 ja 2023 (DNV 2022, 34; DNV 2023b, 24). Kuvasta 4 huomataan, että vuonna 2023 tilattujen alusten kappalemäärästä vain noin neljäsosa toimii muilla kuin öljypohjaisilla polttoaineilla. Toisaalta näiden alusten osuus tilatun laivaston bruttovetoisuudesta (GT englannin kielen termistä ”gross tonnage”) on noin 51 prosenttia (ks. kuva 6). Tämä tarkoittaa sitä, että ei-öljypohjaisilla eli vaihtoehtoisilla polttoaineilla toimivia moottoreita ja polttoainejärjestelmiä on tilattu enemmän isoihin kuin pieniin aluksiin.



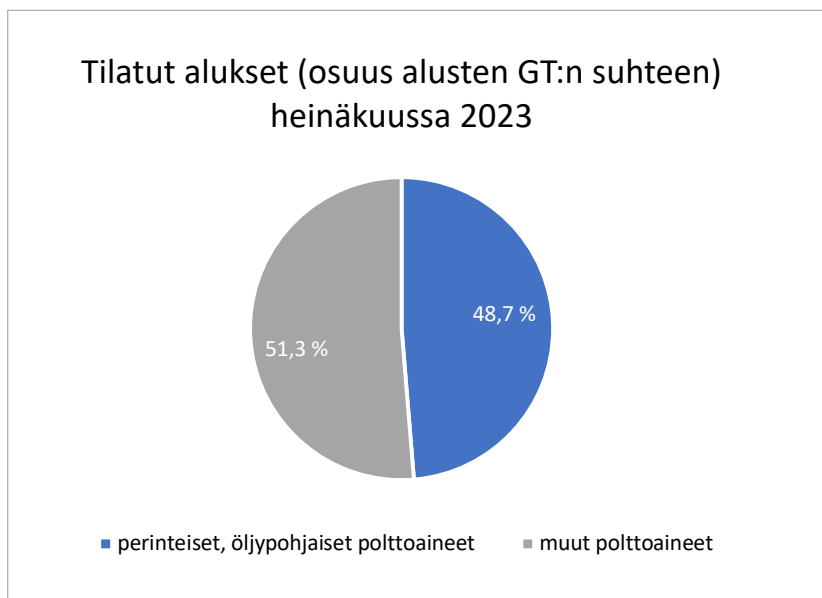
Kuva 3. Laivaliikenteen perinteisillä eli öljypohjaisilla polttoaineilla toimivien alusten osuus tilattujen alusten kappalemäärästä heinäkuussa 2022. Kuvan lähde: DNV (2022, 34).



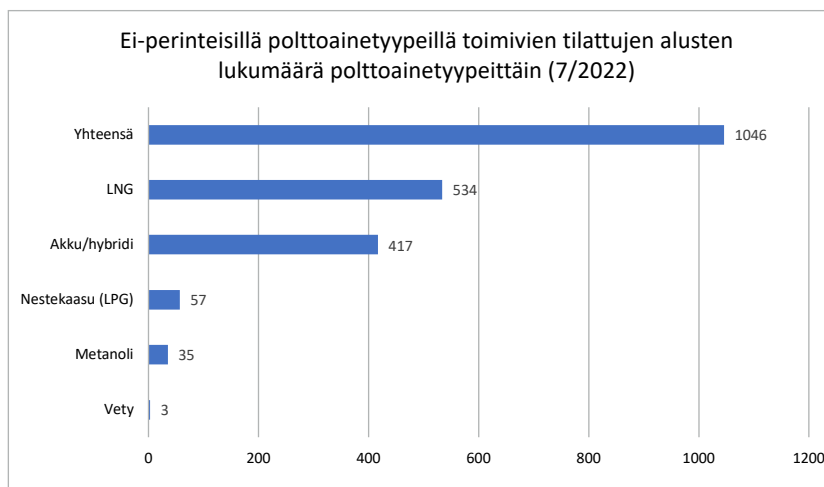
Kuva 4. Perinteisillä eli öljypohjaisilla polttoaineilla toimivien alusten osuus tilattujen alusten kappalemäärästä heinäkuussa 2023. Kuvan lähde: DNV (2023b, 24).



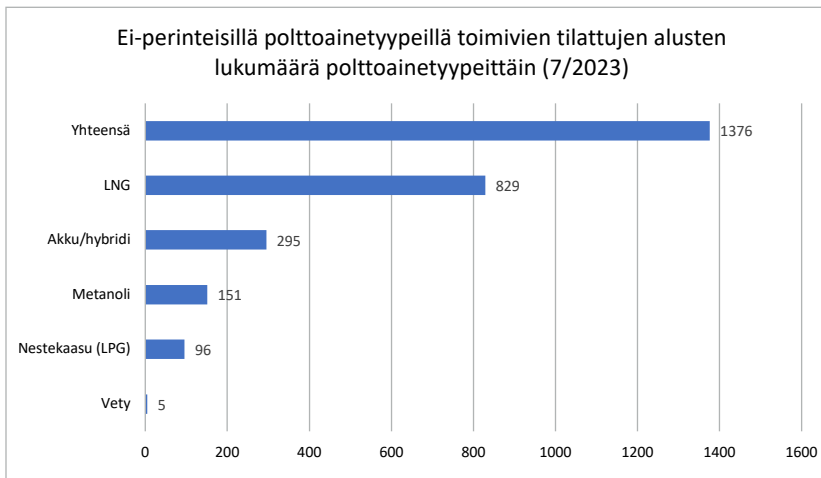
Kuva 5. Perinteisillä eli öljypohjaisilla polttoaineilla toimivien alusten osuus tilattujen alusten bruttovetoisuudesta (GT englannin kielen sanoista Gross Tonnage) heinäkuussa 2022. Kuvan lähde: DNV (2022, 34).



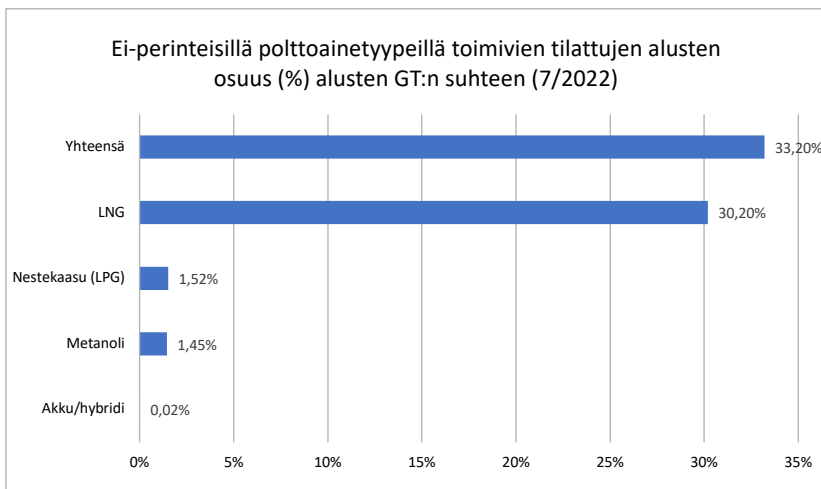
Kuva 6. Perinteisillä eli öljypohjaisilla polttoaineilla toimivien alusten osuus tilattujen alusten bruttovetoisuudesta (GT) heinäkuussa 2023. Kuvan lähde: DNV (2023b, 24).



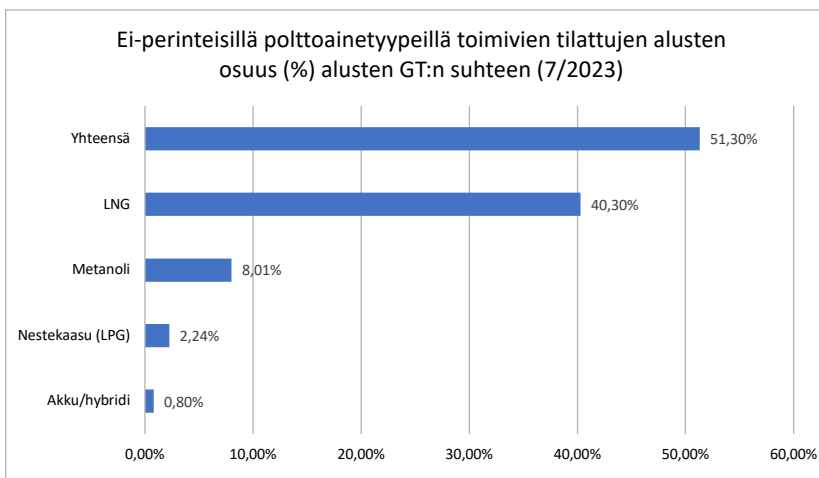
Kuva 7. Ei-perinteisillä polttoainetyypeillä toimivien tilattujen alusten lukumäärä polttoainetyypeittäin heinäkuussa 2022. Kuvan lähde: DNV (2022, 34).



Kuva 8. Ei-perinteisillä polttoainetyypeillä toimivien tilattujen alusten lukumäärä polttoainetyypeittäin heinäkuussa 2023. Kuvan lähde: DNV (2023b, 24).



Kuva 9. Ei-perinteisillä polttoainetyypeillä toimivien alusten osuus kaikkien tilattujen alusten bruttovetoisuudesta polttoainetyypeittäin heinäkuussa 2022. Kuvan lähde: DNV (2022, 34).



*Kuva 10. Ei-perinteisillä polttoainetyypeillä toimivien alusten osuus kaikkien tilattujen alusten bruttovetoisuudesta polttoainetyypeittäin heinäkuussa 2023. Kuvan lähde: DNV (2023b, 24).*

Lisäksi vaihtoehtoisilla polttoaineilla toimivia aluksia tilattiin enemmän vuonna 2023 kuin vuonna 2022. Kappalemääräisesti tilaukset lisääntyivät noin viiden prosenttiyksikön verran (vrt. kuvat 3 ja 4). Näiden alusten osuus tilatun laivaston bruttovetoisuudesta kasvoi sen sijaan vuoden aikana noin 33 prosentista 51 prosenttiin eli 18 prosenttiyksiköllä (vrt. kuvat 5 ja 6).

Kuvista 7–10 näkyy, millä vaihtoehtoisilla polttoaineilla tilatut alukset toimivat. Näitä aluksia oli vuonna 2022 noin 1000 kappaletta ja vuonna 2023 noin 1300 kappaletta. Molempina vuosina LNG-aluksia oli tilattu eniten sekä kappalemääräisesti (kuvat 7 ja 8) että suhteessa tilatun laivaston bruttovetoisuuteen eli tonnistoon (kuvat 9 ja 10). Määrällisesti seuraavaksi eniten oli tilattu akku- ja hybridialuksia, jotka toimivat siis osittain tai kokonaan sähköllä. Tonnistoon nähden näiden osuus tilatusta aluskannasta oli kuitenkin pienin. Tämä johtuu siitä, että akuilla toimivat alukset soveltuvat ainakin toistaiseksi vain lähimerenkulkuun, jossa alukset ovat keskimäärin pienempiä kuin pitkän matkan merenkulussa. Loput tilatuista aluksista toimivat nestekaasulla, metanolilla ja vedyllä. Vetyaluksia tilattiin molempina vuosina vain kourallinen, mikä ei näy ollenkaan osuutena tonnistosta.

On huomionarvoista, että vuonna 2022 vain kolme prosenttia tilatun, vaihtoehtoisilla polttoaineilla toimivan aluskannan tonnistosta toimi muilla kuin nesteytetyllä maakaasulla (ks. kuva 9). Vuonna 2023 osuus kasvoi noin kymmeneen prosenttiin (ks. kuva 10), jota dominoi metanolialusten

kahdeksan prosentin osuus. Metanoliaalusten osuus kasvoi noin 6,5 prosenttiyksikköä vuosien 2022 ja 2023 välillä.

Tilatusta aluskannassa ei ole ollenkaan esimerkiksi ammoniakilla toimivia aluksia. Tämä johtuu siitä, että ammoniakimootoreita ei ole ollut kaupallisesti saatavilla (DNV 2022, 38). Marraskuussa 2023 Wärtsilä kuitenkin lanseerasi merenkulun ensimmäisen kaupallisesti saatavilla olevan, ammoniakilla toimivan nelitahtimootoriratkaisun (Wärtsilä 2023). Vuoden 2024 tilauskirjan mukaan ammoniakilla toimivia aluksia olikin kesäkuuhun mennessä tilattu 25 kappaletta, mikä oli tosin vain noin 0,70 prosenttia tilattujen alusten bruttovetoisuudesta (DNV 2024, 20). Ammoniakkimootorien kysyntä lisääntynee pikkuhiljaa lähivuosina, ja ammoniakista onkin povattu keskipitkän tai pitkän aikavälin polttoaineratkaisua merenkulkuun.

Tilaukantojen perusteella voidaan olettaa, että tulevaisuudessa LNG:n ja metanolin kysyntä merenkulussa lisääntynee. Vaikkei LNG ole öljypohjainen, se on fossiilinen polttoaine. Toistaiseksi myös metanolia valmistetaan lähinnä maakaasusta, joten sekin on fossiilinen polttoaine. Ympäristösääntelyn kiristyessä laivaliikenteen on siirryttävä muilla kuin fossiilipohjaisilla raaka-aineilla tuotettuihin polttoaineisiin. Metanolilla toimivat moottorit toimivatkin yhtä lailla bio- ja e-metanolilla, kun taas LNG-mootoreissa voidaan käyttää biokaasua ja e-LNG:tä. Bioöljyt puolestaan soveltuvat käytettäväksi nykyisissä perinteisillä öljypohjaisilla polttoaineilla toimivissa moottoreissa.

Biopolttoaineista on ennakoitu merenkululle siirtymävaiheen ratkaisua ennen kuin e-polttoaineiden tarjonta lisääntyy. Nämä ovatkin yleisimmin käytetty vähähiilinen polttoainetyyppi merenkulussa tällä hetkellä. Saatavilla on sekä sataprosenttista biopolttoainetta että seoksia. Seoksissa öljypohjaiseen polttoaineeseen sekoitetaan tavallisesti 20–30 prosenttia biopolttoainetta. Niitä käytetään huomattavasti enemmän kuin sataprosenttista biopolttoainetta, ja niiden myynti laivaliikenteelle kasvoi 70 prosenttia vuosien 2021 ja 2022 välillä. On kuitenkin muistettava, että valtaosa laivaliikenteestä kulkee edelleen fossiilisilla polttoaineilla vuonna 2023. (DNV 2023b, 40.)

S&P Global (2023b) on arvioinut vähähiilisten polttoaineiden kysynnän kehittymistä merenkulussa. Biopolttoaineiden kysynnän ennustetaan kasvavan maltillisesti vuosina 2023–2030, mutta metanolin kysynnän oletetaan lisääntyvän merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Arvio tukee alusten tilaukantojen perusteella tehtyä päätelmää metanolin roolista

vähähiilisten polttoaineiden kysynnässä. Myös ammoniakki muodostaa huomattavan osan vaihtoehtoisten polttoaineiden kysynnästä vuonna 2030 S&P Globalin (2023b) otaksuman mukaan.

Lloyd's Registerin esittämässä analyysissä todetaan, että aluskantojen tilausten jatkuessa nykyisellään metanolin osuus laivaliikenteen polttoaineen kulutuksesta voisi olla jopa 43 prosenttia vuonna 2050. Analyysissä kuitenkin povataan, että metanolilla toimivien alusten tilausmäärät eivät tulevaisuudessa kasvaisi nykyiseen tahtiin. Tilausmääriä hillitsisi pelko talteen otetun, kestävästä lähteistä saadun hiilidioksidin riittäväyydestä. Tällöin pitkällä aikavälillä ammoniakkin ja biometaanin rooli laivaliikenteessä olisi metanolia suurempi. (S&P Global 2023c.)

Lloyd's Registerin analyysin mukaan biometanolin ja e-metanolin osuus laivaliikenteen arvioidusta polttoaineen kokonaiskulutuksesta olisi noin 13 prosenttia vuonna 2050, jos metanolimoottoreita ei jatkossa tilata nykyiseen tahtiin. Ammoniakin osuus olisi vastaavasti noin 45 prosenttia eli yli kolminkertainen metanoliin nähden, ja biometaanin osuus noin 34 prosenttia. Siten Lloyd's Registerin oletuksissa nämä kolme polttoainetta muodostaisivat vajaat 93 prosenttia kaikesta laivaliikenteen polttoaineen kulutuksesta vuonna 2050. (S&P Global 2023c.) Kaikki tulevaisuuteen liittyvät estimaatit ovat kuitenkin vain arvioita, joihin tulee suhtautua varauksella. Lisäksi mitä pidemmälle aikavälille arvio on tehty, sitä enemmän siihen liittyy epävarmuutta.

Vähähiilisten polttoaineiden kokonaistarjontaa rajoittaa lyhyellä aikavälillä tuotantokapasiteetti ja sen kehitys (DNV 2023b, 40). Raaka-aineiden saatavuuden merkitys tuotantokapasiteetille vaihtelee polttoainetyypeittäin. Biopolttoaineilla tuotantokapasiteettia rajoittaa ekologisesti kestävä biomassan saatavuus. E-ammoniakilla raaka-aineista vain vihreä vety toimii rajoittavana tekijänä, kun taas metanolin ja e-metaanin tuotantoon tarvitaan vedyn lisäksi hiilidioksidia (S&P Global 2023c). Juuri tämän takia Lloyd's Register ennakoii, että ammoniakilla olisi metanolia isompi rooli laivaliikenteen polttoaineen kulutuksessa pitkällä aikavälillä (S&P Global 2023c). Raaka-aineiden hintojen vaikutusta eri polttoainetyyppien hintoihin sekä hiilidioksidin talteenoton hintoja on pohdittu tarkemmin tämän artikkelin luvussa *Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintoihin vaikuttavat tekijät*.

Lisäksi tarjontaa merenkululle rajoittaa sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä kilpailu polttoaineista muiden toimialojen kanssa. DNV (2023b, 39–42) arvioi, että laivaliikenne tarvitsisi vuonna 2030 noin 18 miljoo-

naa öljykvivalenttitonnia vähähiilisiä polttoaineita, jotta IMO:n kasvihuonekaasutavoitteet kyseiselle vuodelle voitaisiin saavuttaa. Samassa arviossa kokonaistarjonta vuonna 2030 on noin 45–60 miljoonaa öljykvivalenttitonnia. Tämä tarkoittaa sitä, että laivaliikenteen käyttöön pitäisi saada 30–40 prosenttia arvioidusta globaalista vähähiilisten polttoaineiden tarjonnasta. Tämä on DNV:n mukaan ”lähes mahdoton tehtävä”, sillä laivaliikenteen osuus globaalista energiankulutuksesta on vain noin kolme prosenttia. Merenkulku kilpailee e-polttoaineista etenkin teollisuuden toimijoiden kanssa ja biopolttoaineista muiden liikennemuotojen kanssa. (DNV 2023b, 39–42.) Jotta merenkululle kohdistuvaa tarjontaa voisi ennakoida tarkemmin, pitäisi siis olla tiedossa myös muiden sektorien tarve vaihtoehtoisille polttoaineille.

Pitkällä aikavälillä tuotantokapasiteetin lisääntyminen lisää vähähiilisten polttoaineiden kokonaistarjontaa. Esimerkiksi EMSA (2022, 37) arvioi, että vuoden 2040 uusiutuvan sähkön tuotantomäärä riittäisi tuottamaan vihreää ammoniakkia koko globaalin merenkulun energiatarpeisiin. On kuitenkin epäselvää, mikä osuus vihreän ammoniakin tarjonnasta riittää merenkululle. EMSA:n (2022, 35) ennusteen mukaan laivaliikenne tarvitsisi vuonna 2040 noin 270–440 miljoonaa öljykvivalenttitonnia ammoniakkia, jos se olisi ainoa energianlähde sektorilla. Arvioon liittyy epävarmuutta, sillä se perustuu oletukseen laivaliikenteen energiankulutuksen lineaarisesta kasvusta. (EMSA 2022, 45–47.) Joka tapauksessa suuri energiantarve ja kilpailu muiden sektorien kanssa johtavat siihen, että laivaliikenne tarvitsee käyttöönsä useiden eri vähähiilisten polttoaineiden ja muiden energianlähteiden paletin. Myös alusten energiatehokkuuteen on panostettava niiden energiantarpeen vähentämiseksi (DNV 2024, 18).

## Yhteenveto

Vihreä siirtymä ohjaa laivaliikennettä siirtymään nykyisin käytössä olevista fossiilista polttoaineista vaihtoehtoihin, joista syntyy vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä. EU:ssa meriliikenne siirtyy päästökauppaan vuonna 2024. Tämä tarkoittaa sitä, että toimialan on ostettava päästöoikeuksia laivamatkojen aikana syntyneille kasvihuonekaasupäästöille. Lisäksi FuelEU Maritime -asetus velvoittaa asteittain vähentämään EU:n merenkulussa käytettävän energian kasvihuonekaasuintensiteettiä. FuelEU Maritime -asetus rajoittaa sekä laivamatkojen aikana syntyviä että polttoaineiden tuotannosta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä. Myös Kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n on tarkoitus säätää vastaa-

vat, kansainvälisesti sovellettavat veloitteet merenkululle ennen vuotta 2030.

Laivaliikenteen vaihtoehtoisia polttoaineita ovat bioöljyt ja -kaasut sekä synteettiset polttoaineet, kuten metanoli, ammoniakki ja metaani. Meta-nolia ja ammoniakkia voidaan valmistaa maakaasusta, jolloin niitä ei voi kutsua vähähiiliseksi vaihtoehdoiksi tuotannosta aiheutuvien päästöjen takia. Synteettisiä polttoaineita voidaan kuitenkin valmistaa myös hiili-neutraalisti uusiutuvasta sähköstä tuotetun vihreän vedyn avulla. Biopolttoaineita voi tuottaa jätteistä ja muista sivuvirroista vähäpäästöisesti tai esimerkiksi primäärraaka-aineista, kuten palmuöljystä, jolloin tuotannosta aiheutuu päästöjä. Vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotannon päästöjä laskettaessa on siis huomioitava raaka-aineen lähde.

Biopolttoaineita on saatavilla kaupallisesti jo vuonna 2023, mutta niiden tarjonta merenkululle on niukkaa. Niukan tarjonnan takia hinnat ovat pysyneet korkeina, mikä on yksi syy sille, että biopolttoaineiden osuus laivaliikenteen energiankulutuksesta on toistaiseksi pysynyt vähäisenä. Lähivuosina kiristyyvä ympäristösäätely lisää kestävästi tuotettujen biopolttoaineiden kysyntää merenkulussa. Biopolttoaineiden kokonaistarjonta riippuu saatavilla olevien, ekologisesti kestävien raaka-aineiden määrästä. Tarjontaa laivaliikenteelle rajoittanee sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä myös kilpailu biopolttoaineista muiden liikennemuotojen kanssa.

Vuonna 2023 e-polttoaineita ei vielä ole kaupallisesti saatavilla. E-polttoaineiden kokonaistarjontaa rajoittaa lyhyellä aikavälillä tuotantokapasiteetti, jolle vihreän vedyn saatavuudella on tärkeä merkitys. Vihreän vedyn laajamittainen tuotanto vaatii valtavasti investointeja uusiutuvaan sähkön tuotantoon. Investointeja on kuitenkin tehty ja ollaan tekemässä, joten pitkällä aikavälillä e-polttoaineiden tuotannon oletetaan olevan suurta. Kysymys kuitenkin kuuluu, onko tuotanto riittävä takaamaan tarjonnan merenkululle, joka kilpailee e-polttoaineista esimerkiksi teollisuuden kanssa.

Merenkulun vaihtoehtoisten polttoaineiden hintojen kehittymiseen vaikuttaa ratkaisevasti kysynnän ja tarjonnan suhde. Lisäksi hintoihin vaikuttavat muun muassa raaka-aineiden hintojen kehittyminen ja mahdolliset polttoaineverot. Hintojen kehitystä on vaikea ennustaa niihin vaikuttavien lukuisten vaikeasti ennakoitavissa olevien tekijöiden vuoksi. Siksi tulevaisuuden hinta-arvioissa, joita tässä artikkelissa on esitelty, on varsin laajat hintavälit.

Joka tapauksessa laivaliikenteen fossiilisten polttoaineiden on ennakoitu pysyvän kilpailukykyisinä vähähiilisiin polttoaineisiin verrattuna pitkälläkin aikavälillä. Onkin mahdollista, että merenkulussa ostetaan jatkossa paljon päästöoikeuksia. Näin fossiilisten polttoaineiden käyttöä pystytään jatkamaan pidempään, kunnes kasvihuonekaasuintensiteettirajat laskevat niin pieniksi, että niiden saavuttamiseksi on käytettävä vähähiilisiä polttoaineita.

# LÄHTEET

*Aunola, V.* 2019. Merenkulkuala on edelläkävijä päästöjen vähentämisessä. Promaint. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Merenkulkuala-on-edellakavija-paastojen-va-hentamisessa> [Viitattu 21.11.2023].

*Besbes, O. & Savin, S.* 2009. Going bunkers: The joint route selection and refueling problem. *Manufacturing & service operations management* 4, 694–711. Saatavissa: <https://doi.org/10.1287/msom.1080.0249>.

*Brinks, H.W.* 2024. Foresight report on future availability of green/blue ammonia in 2030, 2040 and 2050. Oral presentation. 7<sup>th</sup> International conference on maritime technology and engineering, 14–16 May 2024, Lisbon, Portugal.

*Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M. & Hansson, J.* 2018. Electrofuels for the transport sector: A review of production costs. *Renewable and sustainable energy reviews* 81, 1887–1905. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.288>.

*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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103492>.

*Deign, J.* 2020. So, what exactly is green hydrogen? Greentech media (gtm). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/green-hydrogen-explained> [Viitattu 21.11.2023].

*Det norske veritas [DNV] s.a.* Current price development oil and gas. WWW-dokumentti. Saatavissa: [www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html](http://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html) [Viitattu 21.11.2023].

*Det norske veritas [DNV].* 2021. Maritime forecast to 2050 - Energy transition outlook 2021. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050-download/> [Viitattu 5.10.2023].

*Det norske veritas [DNV]. 2022. Maritime forecast to 2050 - Energy transition outlook 2022. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-2022-edition-235251/> [Viitattu 11.12.2023].*

*Det norske veritas [DNV]. 2023a. Biofuels in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/maritime/publications/biofuels-in-shipping-white-paper-download> [Viitattu 5.10.2023].*

*Det norske veritas [DNV]. 2023b. Energy transition outlook 2023 – Maritime forecast to 2050. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/publications/maritime-forecast-to-2050-edition-2023/> [Viitattu 21.11.2023].*

*Det norske veritas [DNV]. 2024. Energy transition outlook 2024 – Maritime forecast to 2050. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/?gad\\_source=1&gclid=EA1aIQobChMik6vX5NfYiAMVeEKRB1NvwQSEAAAYASAAEgKyJvD\\_BwE](https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast/?gad_source=1&gclid=EA1aIQobChMik6vX5NfYiAMVeEKRB1NvwQSEAAAYASAAEgKyJvD_BwE) [Viitattu 23.9.2024].*

*Elfving, J. 2021. Direct capture of CO2 from air using amine-functionalized resin - effect of humidity in modelling and evaluation of process concepts. Lappeenrantaan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Väitöskirja. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 1004. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/163524> [Viitattu 5.10.2023].*

*Energiategollisuus. 2024. Sähkön hintatilasto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://energia.fi/esitykset/sahkon-hintatilasto> [Viitattu 22.10.2024].*

*Euroopan komissio. 2021a. Revision of the Energy Taxation Directive (ETD): Questions and Answers. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_21\\_3662](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3662) [Viitattu 5.10.2023].*

*Euroopan komissio. 2021b. Proposal for a regulation of the European parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. 2021/0210 (COD).*

*Euroopan komissio s.a. Future-proofing European inland waterway transport - NAIADES III action plan. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-iii-action-plan\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-iii-action-plan_en) [Viitattu 21.11.2023].*

*Euroopan komissio s.a.* Reducing emissions from aviation. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-aviation_en) [Viitattu 21.11.2023].

*European maritime safety agency [EMSA].* 2022. Potential of ammonia as fuel in shipping. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html> [Viitattu 5.10.2023].

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1804.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/959.*

*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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>.

*International energy agency [IEA].* 2019. Indicative shipping fuel cost ranges. WWW-dokumentti. Päivitetty 10.11.2020. Saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/indicative-shipping-fuel-cost-ranges> [Viitattu 21.11.2023].

*International maritime organization [IMO].* 2023. Revised GHG reduction strategy for global shipping adopted. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted.aspx> [Viitattu 21.11.2023].

*International renewable energy agency [IRENA].* 2021. Innovation outlook: Renewable methanol. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Innovation-Outlook-Renewable-Methanol> [Viitattu 21.11.2023].

*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* 142, 110861. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110861>.

Mittelbach, M. 2015. Fuels from oils and fats: Recent developments and perspectives. *European journal of lipid science and technology* 11, 1832–1846. Saatavissa: <https://doi.org/10.1002/ejlt.201500125>.

Neuvoston direktiivi (EY) 2003/96.

Packroff, J. & Kurmayer, N.J. 2023. Energy taxation directive: Europe's key climate law stuck in a quagmire. EURAKTIV. WWW-dokumentti. Päivitetty 22.5.2023. Saatavissa: <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/energy-taxation-directive-europes-key-climate-law-stuck-in-a-quagmire/> [viitattu 5.10.2023].

Plum, C.E.M., Jensen, P.N. & Pisinger, D. 2014. Bunker purchasing with contracts. *Maritime economics & logistics* 4, 418–435.

Port of Helsinki s.a. Hiilineutraali satama. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.portofhelsinki.fi/tietoa-meista/vastuullisuus/ymparistovastuu/hiilineutraali-satama/> [Viitattu 24.10.2023].

Solakivi, T., Paimander, A. & Ojala, L. 2022. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation research part D: transport and environment* 113, 103500. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>.

Stefanakos, C.N. & Schinas, O. 2014. Forecasting bunker prices; a nonstationary, multivariate methodology. *Transportation research part C: emerging technologies* 38, 177–194. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.11.017>.

S&P Global. 2023a. Alternative marine fuels: Monthly market indicators. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/shipping/092823-alternative-marine-fuels-monthly-market-indicators> [Viitattu 24.10.2023].

S&P Global. 2023b. Feature: New US producers plan 4.4 million mt/year green methanol for shipping. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/shipping/091523-new-us-producers-plan-44-million-mt-year-green-methanol-for-shipping> [Viitattu 24.10.2023].

*S&P Global*. 2023c. Methanol's status as top future marine fuel in doubt due to cost, availability. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/market-insights/latest-news/shipping/091123-methanols-status-as-top-future-marine-fuel-in-doubt-due-to-cost-availability> [Viitattu 24.10.2023].

*Tanhuanpää, T.* 2022. Euroopan unionin tavoitteet meriliikenteen päästöjen rajoittamiseksi. Teoksessa Altarriba (toim.) Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTK-hankkeen loppuraportti. Kaakois-Suomen ammattikorkeakoulu. E-kirja. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-503-1> [Viitattu 21.11.2023].

*Transport & environment*. 2023. Alternative fuels infrastructure - Despite electrification ambitions, ports risk fossil gas lock-in. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/TE-Fit-for-55-briefing-AFIR-for-shipping.pdf> [Viitattu 24.10.2023].

*Wärtsilä*. 2023. Wärtsilä jatkaa merenkulun hiilidioksidipäästöjen vähentämistä esittelemällä maailman ensimmäisen ammoniakilla toimivan nelitahtimoottoriratkaisun. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/15-11-2023-wartsila-jatkaa-merenkulun-hiilidioksidipaastojen-vahentamista-esittelemalla-maailman-ensimmaisen-ammoniakilla-toimivan-nelitahtimoottoriratkaisun-3357985> [Viitattu 11.12.2023].

*Zincir, B.* 2022. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: a case study. *International journal of hydrogen energy* 41, 18148–18168. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.03.281>.

*Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E. & Holland, M.* 2018. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation research part D: transport and environment* 59, 223–236. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.12.014>.

# VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET ALUEKEHITYKSEN NÄKÖKULMASTA

Elias Altarriba & Taru Tanhuanpää

© Elias Altarriba



Kymenlaakso on merkittävä logistiikkamaakunta. Haminan-Kotkan satama muodostaa alueen suurimman logistiikkasolmun, jota hyödyntää erityisesti Kaakkois- ja Itä-Suomen raskas teollisuus. Sataman kautta kuljetetaan kontteja, nestemäisiä tuotteita, kuivabulk-tuotteita, kaasua sekä roro-kuljetuksia, joiden lisäksi satama on erikoistunut vaativien projektiluokkien käsittelyyn. Satamanosat ovat Halla, Hamina, Hietasen laiturit, Kantasatama, Mussalo ja Sunila, joista Kotkan Mussalo, Hietanen ja Haminan syväsatama ovat merkittävimmät satama-alueet. Sekä Haminan että Kotkan satamat ovat yhteydessä sähköistettyyn rautatieverkkoon. Rautatieyhteys satamista on Kouvolaan, mistä jatkoyhteydet suuntautuvat Karjalan, Savon ja Lahden radoille. Kouvolaan on lisäksi rakennettu Suomen ensimmäinen, vuonna 2022 valmistunut kuivasatamakonseptin mukainen terminaali (Kouvola RRT). Maantieyhteydet satamasta muualle maahan ovat kohtuulliset: E18-moottorite kulkee Vaalimaalta Turkuun muodostaen erinomaisen kulkuväylän raskaalle rekkaliikenteelle. Pohjoiseen lähtevät maantiet (VT15 ja VT26) ovat tyypiltään vanhoja valtateitä.

Kaakkois-Suomi on merkittävä raskaan teollisuuden, erityisesti metsäteollisuuden keskittymä. Merkittäviä keskittymiä ovat muun muassa UPM Kaukaan metsäteollisuuden integraatti, Ihalaisen kaivos ja Metsä Groupin Pulpin tehdas Lappeenrannassa, Stora Enson Kaukopään tehtaata ja Ovakon terästehtaata Imatralla sekä Metsä Groupin Simpeleen tehtaata. Kymenlaakson raskas teollisuus on kuluneen 20 vuoden aikana ollut merkittävien rakennemuutosten kohteena, mutta Kouvolassa ja Kotkassa toimii edelleen merkittäviä teollisuussektorin tuotantolaitoksia, kuten MM Kotkamills Kotkansaarella ja Stora Enson paperi- ja kartonkitehtaata Anjalankoskella. Kouvolassa toimivat UPM Kymin paperi- ja sellutehtaata sekä UPM Kalson viilutehdas. Lisäksi Mussalon ja Ruissalon satamien välittömään läheisyyteen on sijoittunut huomattava määrä pk-sektorin teollisuuslaitoksia tai suuryritysten toimipisteitä. Alueella syntyikin paljon hiilidioksidipäästöjä vahvan teollisuussektorin takia. Hiilidioksidi on tärkeä raaka-aine muun muassa tulevaisuuden meriliikennepolttoaineiksi kaavailtujen metanolin tai synteettisen metaanin valmistusprosesseissa, joten alueen raskaasta metsäteollisuudesta on etua vaihtoehtoisten polttoaineiden tuotantomahdollisuuksien kannalta. Ennen Venäjän hyökkäyssotaa Ukrainassa alue oli lisäksi erittäin merkittävä idänkaupan solmukohta niin tuonnin kuin vienninkin saralla, mutta sodan seurauksena molempien osapuolten asettamat talouspakotteet ovat vähentäneet idänkauppaa huomattavasti.

Monet perinteisen teollisuussektorin rakennemuutokset ovat realisoituneet Kymenlaaksossa, minkä seurauksena teollisia työpaikkoja on alueelta kadonnut paljon. Tämä on osaltaan kiihdyttänyt alueen väestökatoa. Uusiin ratkaisuihin kuitenkin asetetaan odotuksia, ja vetytalousratkaisut voivat olla yksi tällainen kokonaisuus. Asian tiimoilta Lappeenrannan ja Imatran kaupungit, Kouvola Innovation Oy, Cursor Oy ja Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto toteuttivat 1.2.2023–1.1.2024 Euroopan aluekehitysrahaston tuella *Vetyä, virtaa Kaakkoon* -hankkeen, jossa selvitettiin laajasti alueen mahdollisuuksia ja haasteita vedyn tuotantolaitosten ja jatkojalostetuotteiden tuotannon tiimoilta (Kiviranta ym., 2023). Tämän hankkeen tuotoksia ja havaintoja on hyödynnetty myös MER-POL-hankkeen tiimoilta.

## Vihreän siirtymän investoinnit Kymenlaaksossa

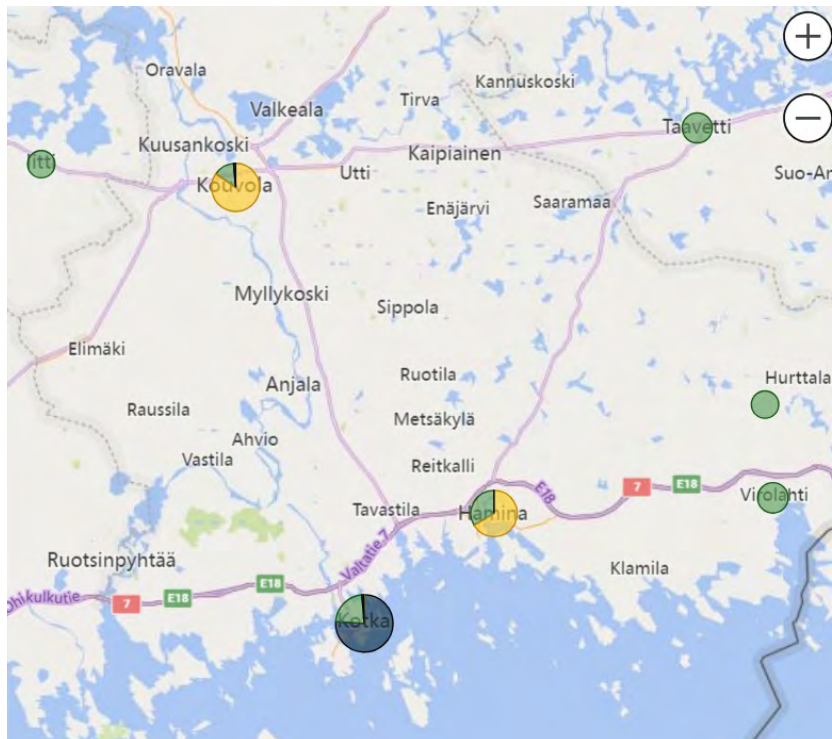
Vihreään siirtymään työpaikkojen ja elinvoiman tuottajana asetetaan paljon odotuksia. Käsite on kuitenkin varsin väljästi määritelty, minkä vuoksi eri toimijat voivat niputtaa tai olla niputtamatta investointejaan tai muita

aktiviteettejaan vihreän siirtymän lipun alle varsin joustavasti. Selkeänä reunaehtona on kuitenkin se, että fossiilisten energianlähteiden hyödyntämistä ja niihin suoraan liittyviä prosesseja ei lasketa osaksi vihreää siirtymää ja myös polttoprosessin hyödyntämistä lähtökohtaisesti tarkastellaan usein kriittisesti. Polttoainetyypistä riippuen jälkimmäiseen katsantokantaan voidaan kuitenkin ottaa jo huomattavasti enemmän näkökulmia. Muutoin vihreän siirtymän käsitteellä voidaan tarkoittaa monia asioita. Usein asiaan liittyy sähkön tuotanto fossiilittomilla ratkaisuilla, yhteiskunnan ja teollisuusprosessien sähköistäminen. Paljon odotuksia asetetaan usein myös power-to-x-tuotantoprosesseihin, joilla tarkoitetaan erilaisten tuotteiden (esimerkiksi synteettisten polttoaineiden) valmistamista sähköenergiaa hyödyntämällä. Vihreällä voidaan tarkoittaa vain tarkasteltavana olevan ratkaisun haittavaikutusten minimoimista ilmastomuutoksen suhteen, mutta toisaalta muitakaan ympäristöongelmia, kuten luontokatoa, happamoitumista ja rehevöitymistä, ei sovi unohtaa. Ratkaisujen elinkaarenaikainen kestävyys nouseekin usein tärkeään asemaan todellista ja toteutunutta ”vihreyttä” arvioitaessa.

Vihreiden investointien vaikutukset alueiden elinkeinorakenteeseen vaihtelevat huomattavasti investoinnista riippuen. Esimerkiksi tuuli- tai aurinkovoimainvestoinnit usein huomioidaan medioissa, ja niiden merkitys hiilidioksidivapaan sähkön tuottamisessa on huomattava, mutta alueelle suoraan tuotettujen työpaikkojen määrä jää kuitenkin vähäiseksi painottuen vahvasti rakentamisvaiheeseen. Prosessiteollisuuden työllistävät vaikutukset ovat yleensä huomattavasti suurempia ja pitkäkestoisempia korkeasta automaatiotasostaan huolimatta. Esimerkiksi akustot kehittyvät nopeasti, ja niiden tarve kasvaa jatkuvasti yhteiskunnan sähköistyessä. Akkuja valmistavien teollisuuslaitosten työvoimantarve on usein merkittävä. Työllisyysvaikutukset tuovat yleensä elinvoimaa koko alueelle hyvin monipuolisesti.

Kymenlaaksoon kohdistuvat mahdolliset vihreän siirtymän investoinnit ovat olleet vahvan poliittisen debatoinnin kohteena. Erityisesti tuulivoimalainvestoinnit ja päästötöntä tuulisähköä hyödyntävät laitosinvestoinnit ovat keskittyneet Länsi-Suomeen (Elinkeinoelämän keskusliitto [EK] s.a.). Esimerkiksi Pohjois-Pohjanmaan alueella yksistään merituulivoimaloihin tehtyjen investointien arvo on noin 11,6 miljardia euroa. Itä-Suomessa tuulivoimalaprojekteilta on myönnetty nihkeästi lupia, koska tuulivoimalat voivat haitata Itärajan tutkavalvontaa (Yle 2022a). Muita esteitä tuulivoiman rakentamiselle Itä-Suomessa ovat järvialueiden laajuus ja kantaverkon riittämättömyys (Yle 2022b). Suunnitelluista, rakentamisvaiheessa olevista ja toteutuneista vihreän siirtymän investoinneista

saa hyvän yleiskuvan Elinkeinoelämän keskusliiton ylläpitämästä *Vihreän siirtymän investoinnit Suomessa* -portaalista (EK, s.a.). Portaalissa on myös investoinnin ilmoittajan antamia arvioita mahdollisista työllisyysvaikutuksista. Esimerkki portaalin käyttöliittymästä Kymenlaaksossa on nähtävissä kuvassa 1.



Kuva 1. Vihreän siirtymän investoinnit Kymenlaaksossa. Värikoodit: musta: esiselvitysvaihe; vihreä: suunnitteluvaihe; keltainen: investointipäätös; tummansininen: käynnistys. (Lähde: <https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/>.)

Vuonna 2024 Kymenlaaksoon sijoittuvien vihreän siirtymän investointien arvo on EK:n (s.a.) mukaan noin 7 miljardia euroa (ks. taulukko 1). Työllisyysvaikutukset ovat parhaimmillaan hyvin merkittäviä: Hankkeiden arvioidaan luovan toteutuessaan noin 7500 uutta työpaikkaa alueelle (ks. taulukko 2). Suurimmat investoinnit, noin 4 miljardia, kohdistuvat akkuteknologioihin, joita seuraa datakeskusten investointien arvo noin 2,5 miljardilla eurolla. Myös uusista työpaikoista valtaosan luovat datakeskus (n. 4000 työpaikkaa) ja akkuteknologiat (n. 2500 työpaikkaa). (EK s.a.)

**Taulukko 1.** Vihreän siirtymän investoinnit Kymenlaaksossa vuoden 2024 arvion mukaan. Datan lähde: EK (s.a.)

Investoinnin kohde	Investoinnin arvo, miljoonaa euroa
Akkuteknologiat	4019
Datakeskus	2500
Aurinkovoima	212
Vety	204
Biokaasu	52
Fossiilisten korvaaminen	34,5
Biojalostamo	30
Biohiili	14
Hukkalämpö	13
Lämmitys	8
Kiertotalous	5,5
<b>Yhteensä</b>	<b>7052</b>

**Taulukko 2.** Vihreän siirtymän investointien luomien uusien työpaikkojen lukumäärä Kymenlaaksossa vuoden 2024 arvion mukaan. Datan lähde: EK (s.a.)

Investoinnin kohde	Työpaikkojen arvioitu lkm.
Data	4190
Akku	2510
Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen	540
Biokaasu	204
Hukkalämpö	35
<b>Yhteensä</b>	<b>7479</b>

Haminassa sijaitsevaa Googlen omistamaa datakeskusta laajennetaan. Keskuksen tuottamaa hukkalämpöä tullaan hyödyntämään Haminan energian kaukolämpöverkossa, ja hukkalämpö kattaa Haminan kaukolämmön tarpeen noin 80-prosenttisesti. Lisäksi Atnorth rakentaa Kouvolaan datakeskuksen, jonka tuottamaa hukkalämpöä tullaan hyödyntämään myös kaukolämmön tuotannossa. Molempien projektien ennakoidaan valmistuvan näillä näkymin jo vuonna 2025. (EK s.a.)

Akkuteknologiaan liittyvät investoinnit näyttäisivät sijoittuvat Kotkaan ja Haminaan. Kaksi sähköautojen akkumateriaaleja valmistavaa tehdasta

on suunnitteluvaiheessa, ja Kotkan tehdas voisi valmistua suunnitelmien toteutuessa vuonna 2027. Lisäksi Suomen Malmijalostus povaa Kotkaan kennotehdasta, josta on käynnissä esiselvitys. Suurin osa akkuteknologiainvestointien luomista työpaikoista (noin 2000 kpl) syntyy vain, jos tämä selvityksessä oleva hanke etenee. Myös sen investoinnin arvo on näistä kolmesta akkuhankkeesta kaikkein suurin (2700 miljoonaa euroa). (EK s.a.)

Aurinkovoimahankkeita on vuoden 2024 tiedon mukaan tulossa Kymenlaakson alueelle kuusi kappaletta, joiden yhteenlaskettu arvo on 212 miljoonaa euroa. Ne sijoittuvat Kouvolaan, Kotkaan, Vironlahdelle, Haminan ja Miehikkälään. Kaikki aurinkovoimalahankkeet ovat suunnitteluvaiheessa, ja ne valmistuvat arviolta vuosien 2024 ja 2026 välillä olettaen, että suunnitelmat toteutuvat. (EK s.a.)

Vihreän vedyn tuotantolaitoksia on suunnitteilla neljä Kymenlaakson alueelle (Kiviranta ym. 2023, 44). Näistä hankkeista on saatavilla tietoa esimerkiksi artikkelissa *Vetyä, virtaa Kaakkoon – hukkalämmön hyödyntämispotentiaali* (Kiviranta ym. 2023, 44–47). Laitosten arvioidaan valmistuvan Kouvolassa ja Haminassa vuonna 2028 ja Kotkassa vuonna 2026. (EK s.a.)

## Vihreän siirtymän investoinnit Kymenlaaksoa ympäröivissä maakunnissa

Kymenlaakson naapurimaakuntiin sijoittuvat investoinnit voivat luoda työpaikkoja myös Kymenlaaksossa asuville joko suoraan tai välillisesti. Lisäksi uusiutuvan sähkön investoinnit ympäröivissä maakunnissa voivat edistää e-polttoaineiden tuotantoa Kymenlaaksossakin sähkön siirtomatkojen lyhentyessä. Tämä edellyttää kuitenkin joka tapauksessa sähkön tuotannon ja kantaverkon siirtokapasiteetin riittävyttä.

Etelä-Karjalaan sijoittuvien tai suunniteltujen vihreän siirtymän investointien arvo on EK:n (s.a.) mukaan yli miljardi euroa. Suurin osa investointien arvosta kohdistuu aurinkovoimaan (noin 900 milj. €) ja fossiilisten energianlähteiden korvaamiseen (noin 100 milj. €). Lappeenrantaan suunnitellaan aurinkovoimalaa, josta voi 600 megawatin maksimitehollaan tulla Euroopan suurin. Voimalan arvioidaan valmistuvan jo vuonna 2026. (EK s.a.) Koska Etelä-Karjalassa investoinnit painottuvat aurinkovoimaan, syntyvien työpaikkojen määrä on investointien rahalliseen arvoon suhteutettuna vähäinen: EK:n arvion mukaan Etelä-Karjalan investoinnit luo-

vat maakuntaan kaiken kaikkiaan noin 130 työpaikkaa. Niistä valtaosa (noin 110 työpaikkaa) keskittyy Imatralle, joka on jo suhteellisen kaukana ainakin läntisemmästä Kymenlaaksosta työmatkan pituutta ajatellen. Lappeenrannan lämpövoima luo arviolta 12 työpaikkaa lisää.

Etelä-Savossa vihreiden investointien arvosta (yli 600 milj. €) suurin osa kohdistuu biojalostamoon (300 milj. €). Vedyn tuotantoon kohdistuu puolestaan 160 miljoonaa euroa ja aurinkovoimaan vajaa 120 miljoonaa euroa. EK:n portaali ei kuitenkaan ota kantaa näiden investointien työllisyysvaikutuksiin. Kuten edellä on todettu, vihreän sähkön investointien suorat työllisyysvaikutukset voivat rakentamisvaihetta lukuun ottamatta jäädä vähäisiksi. Toisaalta on syytä muistaa, että EK:n portaalissa esitetyt investointien luomat työllisyysvaikutukset ovat vain julkisesti annettuja arvioita. Investoivilla yrityksillä on yleensä tarkempi kuva tulevasta työllistämistarpeista, mutta tätä ei välttämättä julkisteta missään etukäteen. On myös mahdollista, että suunnitteluvaiheessa työllisyysvaikutuksia tarkoituksella liioitellaan tavoitteena mahdollisesti saada julkiselta sektorilta parempaa suoraa tai epäsuoraa tukea tehtävälle investointipäätökselle. Toki suunnitelmat voivat tarkentua myös muista syistä prosessin edetessä.

Päijät-Hämeessä investoidaan eniten vedyn tuotantoon (250 milj. €) ja aurinkovoimaan (noin 90 milj. €). Näille investoinneille ei ole julkisesti lupailtu merkittäviä työllisyysvaikutuksia: suurin työllistäjä, Lahden biokaasulaitos, loisi arviolta 25 työpaikkaa lisää. Uudenmaan investointien arvo on puolestaan suuri (yli 13 miljardia euroa). Ainakaan Länsi-Uudenmaan investoinnit eivät kuitenkaan liene merkittäviä Kymenlaakson työllisyydelle tai uusiutuvien polttoaineiden tuotannolle jo maantieteellisten syiden vuoksi. Itä-Uudellemaalle on tulossa muun muassa vihreän sähkön investointeja. Porvoossa vihreän vedyn tuotantolaitos korvaa nykyisen harmaan vedyn tuotantolaitoksen. Loviisaan puolestaan on suunnitteilla aurinkovoimala, jonka on tarkoitus käynnistyä vuonna 2026. Se tuottaisi noin 151 gigawattituntia sähköä vuosittain. (EK s.a.)

Lappeenrantaan sijoittuvan 600 megawatin aurinkovoimalan kapasiteetti on toteutuessaan jo sen verran merkittävä, että sillä voi olla vaikutusta vihreän sähkön saatavuuteen myös Kymenlaaksossa. Asiaa helpottaa se, että alueen raskaan teollisuuden ansiosta alueella on vahvoja siirtoyhteyksiä. Lappeenrannan ja Kouvolan välillä kulkee sekä Fingridin 400 kilovoltin että 110 kilovoltin vahvuinen sähkölinja, ja Kouvolan ja Kotkan välillä kulkee Fingridin 400 kilovoltin sähkölinja (Fingrid 2024). Todenäköisesti verkon vahvistamiselle on kuitenkin tulevaisuudessa tarvetta yhteiskunnan sähköistyessä.

# LÄHTEET

*Elinkeinoelämän keskusliitto [EK] s.a.* Dataikkuna. Suomen vihreät investoinnit. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ek.fi/tutkittua-tietoa/vihreat-investoinnit/> [viitattu 29.8.2024].

*Fingrid.* 2024. Suomen sähkösiirtoverkko 2024. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/kuvat/kartat/seinakartta-2024-150-dpi-70-x-120-cm.pdf> [viitattu 25.9.2024].

*Kiviranta, P., Hyypiä, J., Inkeri, E., Keski-Luopa, M., Rahiala, S. & Tynjälä, T. (toim.).* 2023. Vetyä, virtaa Kaakkoon – hukkalämmön hyödyntämispotentiaali. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. E-kirja. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-344-569-7> [viitattu 23.10.2024].

*Yle.* 2022a. Maakuntajohtajat vaativat hyvitystä itärajan valvonnasta – Itä-Suomi jää paitsi paljon hehkutetusta tuulivoimasta Venäjän läheisyyden vuoksi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-12417048> [viitattu 29.8.2024].

*Yle.* 2022b. Tässä syyt, miksi tuulivoimaa ei ole rakennettu Itä-Suomeen ja miksi asia muuttuu nyt. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20009312> [viitattu 29.8.2024].

# METANOLIN JA BIOKAASUN YMPÄRISTÖKESTÄVYYDEN ANALYSOINTITYÖKALU

Elias Altarriba



© Elias Altarriba

Tässä artikkelissa käsitellään MEPTEK-hankkeessa kehitetyn elinkaarianalyysityökalun (Rahiala 2022a) jatkokehitysversiona. Työkalu on Excel-pohjainen, ja sen avulla käyttäjä voi tarkastella laivaliikenteen eri polttoaineiden ja päästövähennystekniikoiden ekologista ja taloudellista kestävyyttä. Alkuperäisessä versiossa valittavina polttoaineina olivat raskas polttoöljy (HFO), kevyt polttoöljy (MGO) ja fossiilinen nesteytetty maakaasu (LNG). Valittavina päästövähennystekniikoina olivat suljetun ja avoimen kierron rikkipesurit, pakokaasujen takaisinkierrätysjärjestelmä (EGR), vesiruisutusjärjestelmä (WIF) ja katalysaattorijärjestelmä (SCR). Jatkokehitysversiona polttoainevaihtoehdot ovat maakaasusta ja biomassasta valmistetut metanolit sekä biokaasu. Katalysaattorijärjestelmä on valittu ainoaksi valittavissa olevaksi päästökäsittelyjärjestelmäksi, sillä vähärikkisinä polttoaineina rikkipesureille ei ole tarvetta ja vesiruisutusjärjestelmät ovat jäämässä pois markkinoilta. EGR-järjestelmän tehokkuudesta näiden vaihtoehtopolttoaineiden osalta ei ole vielä riittävästi

avointa dataa saatavilla. Metanoli voi olla yksi ratkaisu meriliikenteen päästöjen vähentämiseksi. Metanolia hyödyntäviä moottorityyppejä on jo markkinoilla, tosin niiden kokonaismäärä on hyvin marginaalinen. Bio-kaasuun siirtyminen LNG-aluksissa on lähtökohtaisesti suoraviivainen prosessi. Tässä päivitysversiossa tuotannon aikaisten päästöjen vaikutus kokonaispäästöihin ja tätä kautta ympäristökestävyyteen korostuu.

## Työkälun päivitystarpeen tausta

Meriliikenteen nykyisten ja tulevien polttoaineratkaisujen keskinäinen vertailu on usein haastavaa (Aakko-Saksa ym. 2023, 1–26; Bouman ym. 2017, 408–421; Tadros ym. 2023, 1–32). Asiaa voidaan tarkastella useasta näkökulmasta jo nykyisissä, öljypohjaisissa polttoaineissa. Asia on korostunut Itämeren kaltaisilla merialueilla, missä päästörajat ovat olleet kireämmät jo pidemmän aikaa. Osa varustamoista siirtyi tuolloin käyttämään vähärikkistä kevyttä polttoöljyä, ja osin halvemman polttoaineen kysynnän seurauksena markkinoilla ovat yleistyneet myös vähärikkiset keskiraskaat polttoöljyt. Osa varustamoista on investoinut rikkipesurijärjestelmiin, jolloin alus on voinut käyttää polttoaineenaan rikkipitoisia, hankintahinnaltaan huomattavasti edullisempia raskasöljyjä. Osa varustamoista on investoinut LNG-aluksiin, jotka ovat pääsääntöisesti tosin varustettuja monipolttoainemoottoreilla, jolloin operointi mahdollistuu nesteytetyllä maakaasulla tai vaihtoehtoisesti kevyellä polttoöljyllä. Moottorit itsessään olisivat yleensä säädettävissä toimimaan myös raskaalla polttoöljyllä, mutta kustannussyistä raskaan polttoöljyn esikäsitteilyjärjestelmiin ei yleensä ole haluttu investoida, mikäli tarkoituksena on pääsääntöisesti ollut operoida kaasulla.

Nämä kaikki edellä kuvatut vaihtoehdot perustuvat fossiilisiin energialähteisiin. Fossiilisten energialähteiden ympäristövaikutusten arvioinnissa voidaan painottaa polttoaineen loppukäyttöä. Tämä vaihe vahvasti dominoi muodostuvia päästöjä, mikäli tarkastelukohteena on polttoainetonnin tai muu vastaava polttoaine-erä kuvaava yksikkö. Globaalisti polttoaineen tuotanto, kuljetukset ja osin myös varastointi muodostavat huomattavan päästölähteen. Kuitenkin tarkasteluun otetun polttoaine-erän tuottamissa kokonaispäästöissä näiden osuus on yleensä vain muutamia prosentteja verrattuna loppukäytössä muodostuviin päästöihin. Ympäristövaikutusten arvioinnissa tämä helpottaa asioita, koska polttoaineen käytössä muodostuvat päästöt voidaan teknisesti varsin yksiselitteisesti todentaa, ja mikäli päästöjä halutaan rajoittaa, voidaan ainakin päästöjen lähde varsin yksikäsitteisesti rajata. Varsinaisten toimenpiteiden

ja niiden taloudellisen kilpailukyvyn näkökulmasta asia muuttuikin jo moniulotteisemmaksi.

Kilpailuilla markkinoilla toimiville varustamoille ja muille alan toimijoille polttoaineiden hankintahinta on ratkaisevan tärkeä asia. Alusten absoluuttisesti kuluttamat polttoainemäärät ovat suuria, jolloin pienetkin säästöt hankintahinnassa kertautuvat vahvasti. Eri polttoainetuotteille hintaennusteita on entistä haastavampaa laatia. Aiemmin polttoaineena pääsääntöisesti käytetty rikkipitoinen raskas polttoöljy oli öljynjalostuksen sivutuote, jonka loppukäyttäjää löytyi lähinnä meriliikennesektorilta ja osin energiatuotannosta. Muihin öljytuotteisiin verrattuna raskasöljyjen kysyntä oli vähäistä, ja öljyntuottajien intresseissä oli etsiä sivuvirralla asiakkaita, mikä käytännössä takasi halvan hinnan polttoaineiden verovapauden tukemana. Lisäksi kansainvälisen meriliikennesektorin toimijoiden oli usein helpohko kilpailuttaa polttoainetarjoajat myös valtioiden rajojen ylitse. Raakaöljyn markkinahinnanvaihtelut ja ajoittaiset, yleensä poliittisista syistä muodostuneet öljykriisit toki vaikuttivat myös meriliikenteen polttoaineiden hintatasoon, mutta moniin muihin öljynkäyttäjäsektoreihin verrattuna vaikutukset olivat kuitenkin suhteellisen lieviä.

Sittemmin meriliikennesektorin polttoainemarkkinat ovat mullistuneet täysin. Korkeampijalosteisten tuotteiden kysynnän kasvu erityyppisten päästörajoitustoimien takia on nostanut monien öljytuotteiden hintatasoa huomattavasti. Erityisesti kevyille öljyalaaduille on kysyntää myös muilla sektoreilla huomattavasti raskaita öljyjä enemmän, mikä näkyy usein liki kaksinkertaisessa tonnihinnassa raskaisiin öljyalaatuihin verrattuna. Todellisia operointikustannuksia nostaa päästökauppajärjestelmä (EU/2023/959). Toimijalla on raportointivelvollisuus (EU/2015/757) kulutetusta polttoaineesta ja tuotetuista kasvihuonekaasupäästöistä, minkä perusteella määritetään vaadittavien päästöoikeuksien määrä. Päästökauppa on ollut EU-maissa käytössä teollisuussektorilla jo pidempään, mutta ensimmäiset kymmenen vuotta kyseessä oli lähinnä käsittelymaksun kaltainen lisäkustannus päästöoikeuksien halvan hinnan takia. 2020-luvulla päästöoikeuksien hinnat ovat nousseet huomattavasti johtuen päästökauppavelvoitteiden laajentumisista, päästöoikeuksien ilmaisjakojen vähentymisestä ja päästökaton jatkuvasta kiristymisestä. Fossiilisten polttoaineiden tuottamiin päästöihin vaaditaan päästöoikeuksia täysi määrä, mutta esimerkiksi biopolttoaineet tai synteettiset polttoaineet voidaan määrätyin edellytyksin vapauttaa kokonaan päästömaksuista. Lisäksi EU:n meriliikenteen polttoaineita koskeva FuelEU Maritime-asetus (EU/2023/1805) edellyttää ei-fossiilisten polttoaineiden käytön asteittaista laajentamista tulevien vuosikymmenien aikana.

Toisaalta monien muiden sektoreiden riippuvuutta fossiilisesta öljystä pystytään todennäköisesti vähentämään merkittävästi, mikä osaltaan vaikuttaa myös öljytuotteiden kysyntään. Näiden kaikkien yhteisvaikutuksen arviointi lähivuosikymmenten polttoainehintakehitykseen on käytännössä akateemista arvailua.

Kuten aiemmin on todettu, fossiilisten polttoaineiden ympäristövaikutusten arvioinnissa voidaan keskittyä loppukäytössä muodostuviin päästöihin. Monet vaihtoehtoiset polttoaineratkaisut poikkeavat tästä hyvin vahvasti (Gilbert ym. 2018, 855–866). Niille tyypillistä on, että valmistusprosessi on hyvinkin ratkaisevassa asemassa arvioitaessa polttoaineen ympäristökestävyyttä. Esimerkiksi bioöljyt palaessaan tuottavat hiilidioksidia ilmakehään kuten muutkin hiileen perustuvat yhdisteet palaessaan, mutta ratkaisun voidaan silti katsoa olevan ilmastoystävällinen, mikäli valmistusprosessi sitoo ilmakehän hiiltä polttoaineeseen tavalla tai toisella riittävän tehokkaasti (Chountalas ym. 2023, 1–14). Metanolia on mahdollista valmistaa usealla eri menetelmällä. Erityisesti synteettisten polttoaineiden tuotantoprosessit vaativat huomattavasti sähköenergiaa, jonka tuotantomuodot voivat vaihdella ympäristövaikutuksiltaan huomattavasti. Lisäksi monien uusiutuvien polttoaineiden yhtenä raaka-aineena on vety, jota ei esiinny luonnossa vapaana, vaan sen tuotanto on toteutettava teollisesti. Vedyn tuotanto voidaan jakaa värikoodein seuraavalla tavalla:

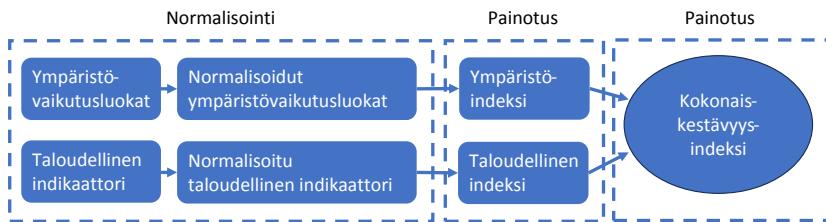
- Vihreä: Elektrolyysi uusiutuvalla energialla
- Harmaa: Höyryreformointi maakaasusta
- Sininen: Höyryreformointi hiilidioksidin talteenottojärjestelmällä
- Turkoosi: Pyrolyysi maakaasusta
- Keltainen: Elektrolyysi aurinkovoimalla
- Pinkki: Elektrolyysi ydinvoimalla
- Musta: Kaasutus kivihielestä

Nämä värikoodit ovat epävirallisia, mutta melko vakiintuneita tapoja puhua vedyn tuotantoprosesseista ympäristönäkökulmasta (Acar & Dincer 2019, 835–849; Ishaq ym. 2022, 26238–26264; Nikolaidis & Poullikkas 2017, 597–611). Väljyyttä käsitteissä on kuitenkin jonkin verran. Esimerkiksi vihreällä vedyllä tarkoitetaan ylipäättään uusiutuvilla energiamuodoilla tuotettua vetyä ja keltainen vety muodostaa tästä näkökulmasta katsottuna vihreän vedyn alakategorian. Toisaalta vihreällä vedyllä voidaan tarkoittaa myös ylipäättään ilmastoystävällistä vedyntuotantomuotoa, jolloin myös ydinvoimalla tuotettu pinkki vety voidaan niputtaa samaan kategoriaan. Harmalla vedyllä taas voidaan tarkoittaa myös laajemmin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvia tuotantomuotoja.

Ympäristövaikutusten ja erityisesti haittavaikutusten arviointiin voidaan ottaa monta näkökulmaa. Tällä hetkellä ilmastonmuutos aiheuttaa vakavaa huolta, minkä takia katsantokanta painottuu selkeästi kasvihuonekaasujen vähentämiseen. On kuitenkin syytä noteerata, että esimerkiksi typen oksidien päästöt, jotka ovat erityisesti meriliikenteen yksi myrkyypäästömuoto, eivät ole hävinneet perinteisistä öljyä polttavista moottoreista mihinkään. Lisäksi alusten hiukkas- tai nokipäästöjä eivät säädökset toistaiseksi rajoita, vaikka erityisesti satamissa tai muutoin asutuksen läheisyydessä niiden haittavaikutukset alueen asukkaiden terveyteen voivat olla huomionarvoisia. Päästöjen haitallisuuden arviointi menee kuitenkin aina trendien mukaan. On mahdollista, että tulevaisuudessa tällä hetkellä puhtaiksi ymmärrettyjen tuotantomuotojen osalta havahdutaan yllättäviinkin haittavaikutuksiin.

Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu (MEPTEK) -hanke toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa 1.5.2020–31.12.2022. Hankkeen yhtenä tuotoksena kehitettiin Excel-pohjainen laivaliikenteen päästövähennysmenetelmien vertailutyökalu (Rahiala 2022a, 172–199; Rahiala 2022b, 221–248), johon työkalun käyttäjä voi luoda erilaisia polttoaineiden ja päästövähennysmenetelmien kombinaatioita ja vertailla niiden tehokkuutta taloudellisesta ja ympäristökestävyyšnäkökulmasta. Työkalussa hyödynnetään kestävyysindeksimenetelmää (Iannaccone ym. 2020, 1–13). Kestävyysindeksi on lukuarvo, joka yhdistää taloudellisen ja ympäristökestävyyden yhdeksi indeksiksi. Tällä lähestymistavalla pyritään yhdenmukaistamaan muutoin haasteellisesti vertailtavissa olevia asioita.

Kuva 1 havainnollistaa kestävyysindeksin laskentaa. Kestävyysindeksi koostuu talous- ja ympäristöindekseistä. Ympäristöindeksi vastaavasti koostuu ympäristövaikutusluokista (ks. kappaleet *EP*, *AP* ja *HHPA* sekä *GWP\_100*), jotka määritetään toisistaan riippumatta. Tämän jälkeen kukin ympäristövaikutusluokka normalisoidaan valitulla kertoimella. (Rahiala 2022b, 212–213.) Tämä on välttämätöntä elinkaarianalyyssissä, jotta eri vaikutusluokkien indikaattoritulosten suhteellinen suuruus voidaan määrittää (Rahiala 2022b, 212; SFS-EN ISO 14044:2006, 29). Myös taloudellinen indikaattori lasketaan erikseen ja normalisoidaan, jolloin syntyy taloudellinen indeksi. LCA-työkalussa käytetyt normalisointikertoimet on esitetty artikkelissa Rahiala (2022b, 213).



Kuva 1. Kokonaiskestävyysindeksin muodostaminen yksinkertaistettuna. Lähde: Rahiala (2022b, 212).

Normalisoinnin jälkeen ympäristövaikutusluokat yhdistetään ympäristöindeksiksi valituilla painokertoimilla (ks. kuva 1). Painokerroin ilmaisee, kuinka suuri suhteellinen vaikutus ympäristövaikutusluokalla on ympäristöindeksiin. Lopuksi ympäristöindeksi ja taloudellinen indeksi yhdistetään kokonaiskestävyysindeksiksi valitsemalla kummallekin indeksille vielä oma painokerroimensa (ks. kaava 1). LCA-työkalussa käytetään oletusarvoisesti painokerrointa 0,5 kummallekin indeksille. Tällöin kummallakin kestävyysindeksillä on yhtä suuri vaikutus kokonaiskestävyysindeksiin. Käyttäjä voi halutessaan muuttaa painokertoimia työkalussa, jos hän haluaa painottaa enemmän esimerkiksi ympäristöindeksin merkitystä kokonaiskestävyyden arvioinnissa. (Rahiala 2022b, 212–213.)

$$SusI = \alpha \cdot EnvI + (1 - \alpha) \cdot Ecl, \quad (1)$$

jossa SusI on kokonaiskestävyysindeksi (Sustainability Index), EnvI on ympäristöindeksi (Environmental Index) ja Ecl on taloudellinen indeksi (Economic Index) ja  $\alpha$  on valittu painokerroin. Painokerrointen summa on aina yksi. (Rahiala 2022b, 212–213.)

Alkuperäisessä työkaluversiossa polttoaineratkaisuina ovat raskas ja kevyt polttoöljy, sekä nesteytetty maakaasu LNG. Käyttäjä voi valita alukseensa suljetun tai avoimen kierron rikkipesurit sekä typen oksidien päästövähennysmenetelmien joukosta SCR-katalysaattorin, vesiruisutusjärjestelmän (WIF) tai pakokaasujen takaisinkierrätysmenetelmän (EGR). Työkalun muista ominaisuuksista ja valittavista lähtöarvoista on kerrottu tarkemmin hankkeen loppuraportissa artikkelissa *Päästövähennysmenetelmien taloudellisen ja ympäristösuorituskyvyn vertailu* (Rahiala 2022b, 221–248).

MERPOL-hankkeessa tästä työkalusta on tuotettu jatkokehitysversio, jossa vertaillaan kahta metanoliratkaisua ja biokaasua kestävyysindeksimenetelmällä. Metanoliratkaisut ovat maakaasusta ja biomassasta tuotetut metanolit. Muutoin työkalu on pidetty konstruktioltaan melko saman-

kaltaisena, jotta vertailu aiemman version polttoaineratkaisuihin (HFO, MGO, LNG) mahdollistuu. Metanolivaihtoehdoille ja biokaasulle rikkipeureita ei kuitenkaan tarvita, joten ne on poistettu työkalusta. Käytännössä typen oksidien vähentämistekniikoissa SCR-katalysaattorit ovat korvanneet vesiruiskutusjärjestelmät. Käyttäjä voi syöttää työkaluun haluamansa alkuarvot myös polttoaineiden oletetuille valmistusprosesseille. Tämä onkin tärkeää, sillä valmistusprosessien aikaiset päätöt ratkaisevat hyvin pitkälle sen, miten kestäviä ympäristönäkökulmasta katsottuna nämä vaihtoehdot ovat verrattuna aiemmin mainittuihin fossiilisiin polttoaineisiin. Tässä artikkelissa kerrotaan päivitetyn työkalun ominaisuuksista ja laskentaperiaatteesta.

## Ympäristökestävyyden analyysityökalun sisältö

Tässä luvussa esitellään LCA-työkalun rakenne välilehdittäin. Välilehdet ovat aakkosjärjestyksessä. Laskentamenetelmät ja kestävyysindeksin teoreettinen viitekehys on esitelty perusteellisemmin MEPTEK-analyysityökalua käsittelevässä artikkelissa (Rahiala, 2022a, 172–199).

## Annual consumption ja fuel consumption

Kestävyysindeksin laskenta perustuu vuosittaiseen polttoaineen kuluutukseen. Vaadittava energiankulutus lasketaan Annual consumption -välilehdellä valittujen keskimääräisten kuormitusten ja Input-välilehdellä valittujen enimmäistehojen perusteella. Enimmäistehona on sekä pääkoneissa että apukoneissa käyttäjän valitsema lukuarvo, ja kuormitusarvot määritetään erikseen merellä, satamassa ja satamamanoveerauksessa tapahtuvaan operointiin. Tuloksena saadaan vuosittainen energiakulutus, jonka työkalu muuttaa Fuel cons -välilehdellä kulutetuksi polttoaineksi polttoainekohtaisen ja käyttäjän valitseman ominaiskulutusarvon perusteella. Tuloksena aluksen polttoaineen kulutus saadaan muodossa tonnia/vuosi.

## Economical index

Economical index -välilehdellä määritetään lähtöarvot talousindeksin (engl. economical index) laskemiseksi. Talousindeksi koostuu pääomakustannuksista ja operointikustannuksista, ja se lasketaan nettonykyar-

vomenetelmällä (engl. net present value eli NPV). Pääomakustannuksiin huomioidaan päästökäsittelyjärjestelmien investointikustannukset sekä nesteytettyä kaasua polttoaineena käyttävien alusten polttoainejärjestelmän aiheuttamat lisäinvestointitarpeet. Operointikustannukset on eritelty polttoainekuluihin, huoltokuluihin ja ympäristöveroihin tai -maksuihin. Tulokset normeerataan normalisointikertoimella, jolloin nettonykyarvosta muodostuu taloudellinen indeksi.

## Emission abatement

Tällä välilehdellä huomioidaan SCR-katalysaattoreiden toiminnasta aiheutuvat lisäpäästöt. Valittavissa on mahdollinen polttoaineen kulutuksen lisääntyminen sekä urean kulutus yksikössä g/kWh. Lähtöoletuksena on, että SCR-katalysaattorilla ei ole merkittävää vaikutusta aluksen polttoaineen kulutukseen. Urean kulutuksen arvoa voidaan säätää tarpeen mukaan.

## EP, AP ja HHPA

Ympäristöindeksi yhdistää neljä ympäristöongelmaa yhdeksi lukuarvoksi. Näitä ongelmia kutsutaan potentiaaleiksi. Rehevöitymispotentiaali (EP), happamoitumispotentiaali (AP) ja terveysindeksipotentiaali (HHPA) määritellään nimiensä mukaisilla välilehdillä. Potentiaalien laskennassa huomioidaan sekä käytön aikaiset että polttoaineen tuotannosta muodostuneet päästöt vuositasolla. Rehevöitymispotentiaalin laskennassa huomioidaan ammoniakki- ( $\text{NH}_3$ ), typpioksiduuli- ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ja typpidioksidipäästöt ( $\text{NO}_2$ ). Happamoitumispotentiaaliin vaikuttavat ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ), typpidioksidi ( $\text{NO}_2$ ) ja rikkidioksidi ( $\text{SO}_2$ ). Terveysindeksiin vaikuttavat päästötyypeistä ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ), typen oksidit ( $\text{NO}_x$ ), rikkidioksidi ( $\text{SO}_2$ ) ja hiukkaset ( $\text{PM}_{2,5}$  ja  $\text{PM}_{2,5-10}$ ).

## GWP\_100

Ympäristöindeksiin kuuluva neljäs potentiaali on GWP (engl. global warming potential). GWP\_100-välilehdellä lasketaan eri polttoainevaihtoehtojen ilmaston lämpenemisvaikutus eli GWP-potentiaali käyttäen kertoimia, joilla vaikutusta arvioidaan 100 vuoden ajanjaksolla. Potentiaalissa huomioidaan polttoaineen käytöstä ja valmistuksesta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt. Valitut kasvihuonekaasupäästöjen kertoimet

perustuvat CML 2016 -menetelmään (CML 2016). Tarkasteltavat päästöt ovat erikseen fossiilisista ja biologisista lähteistä oleva hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O) ja musta hiili (BC). Myös SCR-katalysaattorien lisäaineen osalta huomioidaan urean tuottamisesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt (CO<sub>2</sub>).

## Input

Input-välilehti sisältää tarkasteltavana olevan aluksen lähtötietojen syöttämisen työkaluun. Käyttäjä valitsee aluksen pääkoneiden ja apukoneiden kokonaistehon. Mikäli aluksessa on ainoastaan pääkoneiksi luokiteltavia voimanlähteitä, voidaan apukonesarake jättää tyhjäksi. Pääkoneiden keskimääräinen kuormitus merellä toimittaessa voidaan valita suoraan Input-välilehdellä Annual consumption -välilehden sijaan. Kone-tietojen lisäksi välilehdellä valitaan aluksen keskimääräiset operointitunnit merellä, satamamanoveerauksessa ja laiturissa vuositasolla. Lisäksi tällä välilehdellä valitaan polttoainevaihtoehtokohtaiset ominaiskulutukset (g/kWh) ja eri ympäristöpotentiaalien (GWP100, AP, EP, HHPA) painokertoimet.

## Input\_costs

Kustannusvälilehdellä käyttäjä valitsee eri järjestelmien ja polttoainevaihtoehtojen kustannustason. Pääomakustannukset koostuvat SCR-katalysaattorijärjestelmän investointikustannuksista. Lisäksi vastaavat kustannukset lasketaan metanoli- tai kaasumoottorijärjestelmälle lisäkustannuksina verrattuna perinteiseen polttoöljykäyttöiseen meridieselmoottoritekniikkaan. Kustannukset lasketaan euroina kilowattia kohden. Operointikustannuksissa huomioidaan polttoaineiden hintataso, operointi- ja huoltokulut ja mahdolliset ympäristöverot tai vastaavat maksut. Polttoaineen hintataso on valittavissa euroina tonnia kohden polttoainetyypeittäin. Huoltokuluissa huomioidaan katalysaattorijärjestelmän arvioidut lisäkustannukset kilowattituntia kohden. Ympäristöveroilla tarkoitetaan lainsäädännöllä aiheutettua lisämaksua tuotettua hiilidioksiditonnia kohden, mikä voi periaatteessa olla yhtä lailla päästökauppanmaksu, hiilidioksidivero tai vastaava kasvihuonekaasupäästöistä johtuva polttoainevero. Diskonttokorko koskee pääomakustannuksia, minkä lisäksi ympäristö- ja talousindeksin painokertoimet valitaan tällä välilehdellä.

## Norm&weight\_GWP100

Tällä välilehdellä lasketaan polttoainekohtaiset ympäristöpotentiaalien normalisoidut arvot huomioiden Input-välilehdellä valitut painotukset. Normalisointikertoimet ovat käyttäjän valittavissa, ja työkalussa oletusarvoina olevat valinnat lähteineen ovat nähtävissä tällä välilehdellä. Ympäristöindeksi voidaan laskea kokonaisarvona tai vaihtoehtoisesti eritellä fossiiliseen tai bioperäiseen lähteeseen. Tällä on vaikutusta, kun arvioidaan GWP-vaikutusta. Fossiilisen polttoaineen tuottama hiilidioksidi lämmittää ilmastoa kaikissa tapauksissa. Sen sijaan biologisesta lähteestä peräisin olevan hiilidioksidin voidaan joissain tapauksissa arvioida muodostavan suljetun hiilikierroksen, kun ilmakehän hiili sitoutuu kasveihin tai muuhun bioainekseen yhteyttämisprosessissa olettaen, että prosessissa hyödynnetty biomassa ei ole peräisin primäärimetsästä tai muutoin edesauta metsäkatoa. Tällä välilehdellä työkalu muodostaa lisäksi kaaviot ympäristöindeksin antamista tuloksista. Ne sisältävät erittelyn biologisesta ja fossiilisesta lähteestä oleviin tuloksiin lasketun kokonaisympäristöindeksin lisäksi.

## Production emissions

Polttoaineiden tuotantoprosessin aikaiset vuositason syntyneet päästöt määritetään tällä välilehdellä. Erityisesti biopolttoaineiden tuotannon aikaisilla päästöillä voi olla ratkaiseva vaikutus kyseisen polttoaineen kokonaisympäristökestävyyteen. Tuotantoprosessien ympäristövaikutuksista huomioidaan vain ilmapäästöt. Tarkasteltavat päästökomponentit ovat ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ), fossiilisista ja biologisista lähteistä oleva hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ), hiilimonoksidi (CO), metaani ( $\text{CH}_4$ ), typpidioksidi ( $\text{NO}_2$ ), typpioksiduuli ( $\text{N}_2\text{O}$ ), haihtuvat orgaaniset yhdisteet (NMVOC), hiukkaset ( $\text{PM}_{2.5}$  ja  $\text{PM}_{2.5-10}$ ) ja rikkidioksidi ( $\text{SO}_2$ ). Lisäksi urean valmistuksesta syntyneet päästöt lasketaan ammoniakkin ( $\text{NH}_3$ ), fossiilisen hiilidioksidin ( $\text{CO}_2$ ), hiilimonoksidin (CO), typpidioksidin ( $\text{NO}_2$ ), hiukkasten ( $\text{PM}_{2.5-10}$ ) ja rikkidioksidin osalta ( $\text{SO}_2$ ). Polttoainekohtaiset massa- ja skaalautuvat päästökertoimet määritellään polttoainekohtaisesti välilehdillä Fuel emission methanol\_NG, Fuel emission methanol\_BM, LBG ja urean osalta välilehdellä Urea.

## Results\_impact\_categories

Tämä välilehti koostaa ympäristöindeksin sisältämien potentiaalien eli GWP100 (global warming potential), EP (eutrophication potential), AP (acidification potential) ja HHPA (human health particulate air) vaikutukset polttoainetyypeittäin. Välilehti sisältää koostetaulukon ja kaavioita, missä päästöjen vaikutusta kuhunkin potentiaaliin voi tarkastella potentiaaliakohtaisesti.

## Results\_index

Tulosvälilehti muodostaa koosteen ympäristö-, talous- ja kestävyysindeksistä. Kaikkien indeksien laskennalliset tulokset on esitelty sekä taulukoissa että kaavioissa. Varsinaisia uusia, muilla välilehdillä esittämättömiä tuloksia tällä välilehdellä ei ole.

## Ship emissions

Aluksen käytönaikaiset päästöt määritetään Ship emissions -välilehdellä. Käyttäjä valitsee päästötyyppikohtaisen kertoimen jokaiselle polttoainetyypille, minkä perusteella lasketaan vuosittainen päästömäärä tonneina. Valittavia päästötyyppejä, joille on mahdollista valita yksi arvo, ovat hiilimonoksidi (CO), metaani (CH<sub>4</sub>), typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O) ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (NMVOC). Hiilidioksidipäästöt (CO<sub>2</sub>) voidaan määrittää erikseen olevan peräisin biologisista tai fossiilisista lähteistä. Typen oksidien (NO<sub>x</sub>) päästöille voidaan teknisesti valita alkuperäisen MEPTEK-työkalun rakenteen vuoksi neljä eri lukuarvoa (TIER 0-III, jotka ovat IMO:n määrittelemiä rajoja typen oksidien enimmäispäästöille), mutta käytännössä nykyiset päästövaatimukset yksinkertaistavat tarkastelutarvetta huomattavasti (TIER II ja III). Pienhiukkasille on kaksi kokoluokkaa PM<sub>2.5</sub> ja PM<sub>2.5-10</sub>. Rikkidioksidipäästöt (SO<sub>2</sub>) ja musta hiili (BC) voidaan määrittellä kahdella eri yksiköllä.

## Sust\_index\_GWP100

Kestävyysindeksi lasketaan ympäristö- ja talousindeksien perusteella tällä välilehdellä huomioiden käyttäjän valitsemat painokertoimet. Polttoainekohtaisesti suoritettua laskennassa eritellään fossiilisiin ja biologisiin lähteisiin perustuvat tuotteet. GWP-potentiaalissa käytetyt kertoimet pe-

rustuvat GWP100-arvoon, jolla arvioidaan ilmaston lämpenemisvaikutusta 100 vuoden ajanjaksolla.

## Technical sheet 1 & 2

Teknisistä välilehdistä ja niiden sisällöstä käyttäjän ei tarvitse välittää. Ne on tarkoitettu lähinnä indeksilaskennan teknisen toteutuksen tueksi.

## Työkalun käytettävyys

Erityyppisten kerrannaisvaikutusten keskinäinen arviointi ja niiden tärkeysjärjestykseen asettaminen on usein haastavaa. Ympäristövaikutuksia arvioitaessa tällaisen monikriteerisen ongelmakokonaisuuden tarkastelun äärelle kuitenkin joudutaan, missä ratkottavana on erityyppisten ympäristöhaittojen lisäksi myös taloudelliset vaikutukset. Kun muuttujia on paljon, vuorovaikutussuhteet ovat monimutkaisia ja joudutaan yleensä toimimaan puutteellisten tietojen varassa, muodostuu malleista helposti varsin monimutkaisia.

Erilaiset indeksit ovat yksi lähestymistapa, jolla voidaan tavoitella yksinkertaistettua arviota eri lähtötietojen vaikutuksesta lopputulokseen. Tämän vuoksi indeksejä käytetäänkin suhteellisen laajasti mallintamaan monimutkaisia kokonaisuuksia. Maailman tunnetuimpiin kuuluva indeksi lienee kansantalouden arvonlisäystä kuvaava bruttokansantuote. Tällaisesta lähestymistavasta ja analysointimenetelmästä on sekä etua että haittaa: Mallit kevenevät laskennallisesti, ja lopputuloksena saadaan selkeästi ilmaistu lukuarvo tai arvojoukko, joiden muutoksia lähtöarvojen muutosten suhteen on inhimillisesti helpompi tarkastella. Haittapuolena indekseissä yleensä onkin juuri asioiden suhteellisen vahva yksinkertaistaminen. Tästä voi seurata ja usein seuraakin, että kaikkia oleellisia (tarkasteltavana olevia) systeemin ominaisuuksia ei saada indeksimalleilla simuloitua, ja joissain tilanteissa mallit voivat hukata hyvinkin paljon informaatiota. Tämän vuoksi oleellista onkin, että mallin käyttäjä ymmärtää aina mallin ominaisuudet, toimintaperiaatteet, sekä tulosten sovellettavuuden erilaisiin tilanteisiin. Muutoin vaarana on virheelliset johtopäätökset tuloksista, jotka on saatu muutoin sinänsä toimivasta mallista.

Työkalun päivitetystä versiosta on julkaistu vertaisarvioitu konferenssiartikkeli CSuM 2024 (7<sup>th</sup> Conference on sustainable mobility) -konferenssissa (Tanhuanpää ym. 2024). Konferenssiartikkelissa tehtyä analyysiä

käytetään tässä esimerkkinä työkalun ominaisuuksista. Taulukossa 1 on esitetty kuvitteellisen aluksen tekniset lähtötiedot. Analyysissä käytetyt polttoaineiden tuotannon ja käytön päästökertoimet (Bengtsson ym. 2011), normalisointi- ja karakterisointikertoimet sekä taloudelliset lähtöarvot sisältäen investointi- ja operointikustannukset on esitetty lähteineen konferenssiartikkelin liitteessä 1 (Tanhuanpää ym. 2024).

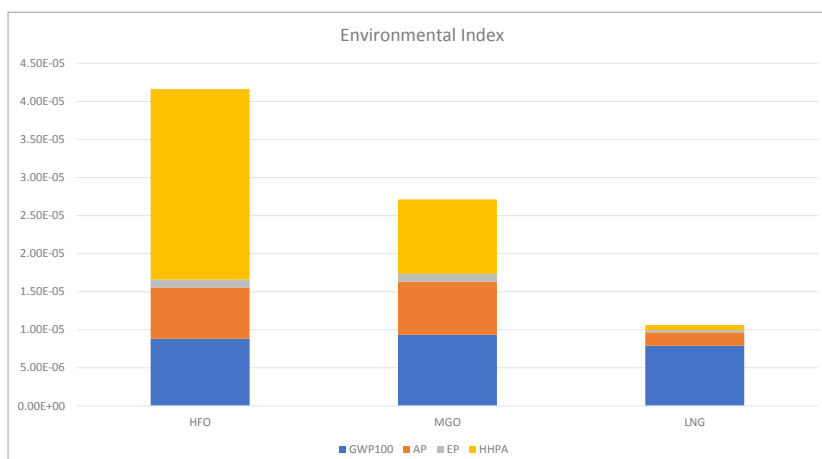
**Taulukko 1.** Aluksen lähtötiedot

Muuttuja	Arvo	Yksikkö
Pääkoneet (ME)	40 000	kW
Apukoneet (AE)	4 000	kW
Alus laiturissa	1 500	h
Alus merellä	7 000	h
Satamamanoveeraus	260	h
SFOC (raskas polttoöljy eli HFO)	185	g/kWh
SFOC (merenkulun kaasuöljy eli MGO)	190	g/kWh
SFOC (metanoli eli MeOH)	360	g/kWh
SFOC (nesteytetty maa- tai biokaasu eli LNG, LBG)	156	g/kWh
Kuormitus laiturissa (ME/AE)	0/40	%
Kuormitus merellä (ME/AE)	70/30	%
Kuormitus manoveerauksessa (ME/AE)	20/70	%

Ympäristöindeksin tulokset taulukon 1 lähtöarvoilla perinteisille laivapolttoaineille (HFO, MGO ja LNG) on esitetty kuvassa 2. Indeksien tuloksinna lähempänä nollaa olevat arvot ovat ympäristökestävyyden kannalta parempia. Lisäksi oletuksena on, että aluksessa ei ole käytössä mitään päästöjen vähennystekniikkaa, minkä seurauksena LNG:n saamat positiiviset tulokset korostuvat verrattuna öljypolttoaineisiin. Mikäli päästövähennystekniikoita hyödynnetään, tasaantuvat tulokset erityisesti HHPA- ja AP-potentiaalien osalta. Näistä tuloksista on mahdollista saada lisätietoa MEPTek-hankkeen loppuraportin artikkeleista (Rahiala 2022a ja Rahiala 2022b).

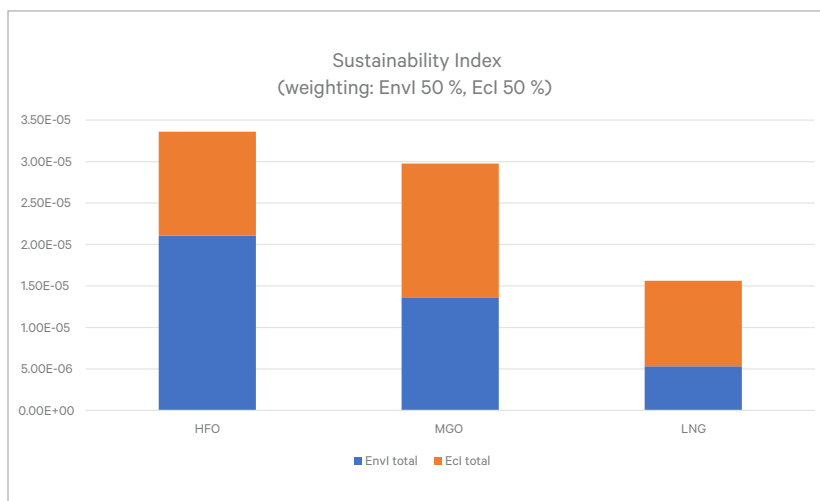
Kuvassa 2 esitettyjen polttoaineratkaisujen GWP100-potentiaalin arvot ovat hyvin lähellä toisiaan. Tämä on luonnollista, sillä HFO:n ja MGO:n ominaiskulutukset ja hiilidioksidipäästökertoimet ovat hyvin lähellä toisiaan. LNG:n pitäisi lähtökohtaisesti olla öljypolttoaineita parempi vaihtoehto, mutta metaanipäästöt vähentävät tehokkaasti pienemmästä

ominaiskulutuksesta ja alemmasta hiilidioksidipäästökertoimesta muodostuvaa etumatkaa. Valitulla metaanislipillä eli -vuodolla GWP100-indeksi on kuitenkin hieman öljypolttoaineita parempi. Suurimmat erot muodostuvat happamoitumis- (AP) ja terveystentiaaleissa (HHPA). LNG on lähtökohtaisesti näissä hyvä vaihtoehto, sillä typen oksidien päästöt ovat hyvin alhaiset ilman mitään päästövähennystekniikoita. Lisäksi LNG on käytännössä rikitöntä. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin syytä huomata, että näitä päästötyyppejä on mahdollista tehokkaasti vähentää jälkikäsitteilyjärjestelmillä myös öljypolttoaineita käytettäessä.



Kuva 2. Ympäristöindeksi perinteisille laivapolttoaineille (HFO, MGO, LNG) laskettuna työkalun päivittämättömällä versiolla (Lähde: Tanhuanpää ym. 2024.)

Kuvan 2 polttoainevaihtoehdoille lasketut kestävyysindeksit on esitetty kuvassa 3. Painotukseksi on valittu ympäristö- ja talousindeksien välille 50/50 %. Talousindeksiin vaikuttaa vahvasti erityisesti malliin valittu polttoaineen hintataso, joka (HFO: 580 €/t, MGO: 885 €/t, LNG: 610 €/t) tässä esimerkissä perustuu lähteeseen Åström ym. (2018). Polttoaineen hintavaihtelut ovat kuitenkin erityisesti viime vuosina olleet suuria johdun hyvin epästabiliista markkinatilanteesta, ja lopulliset, toteutuneet polttoaineen hankintakustannukset ovat yleensä ainoastaan varustamon tiedossa.

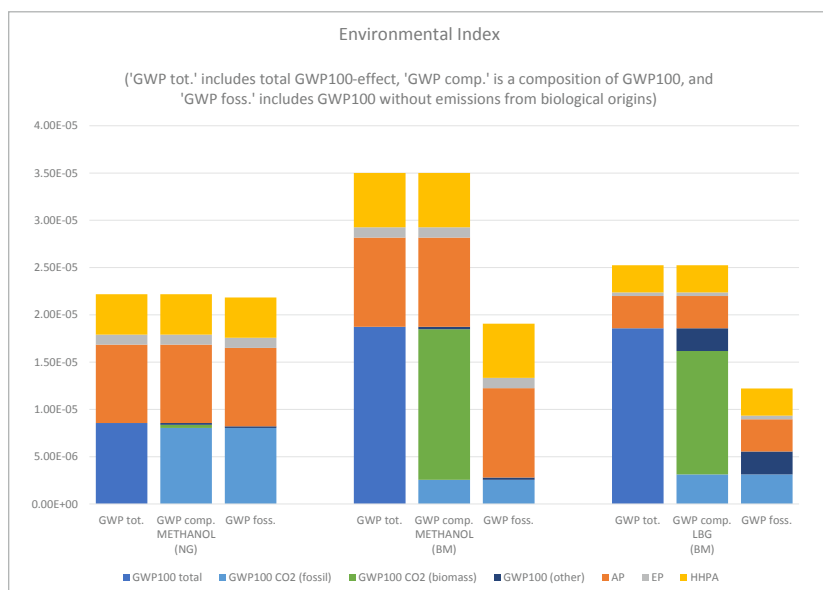


Kuva 3. Kestävyyssindeksi perinteisille laivapolttoaineille (HFO, MGO, LNG) laskettuna työkalun päivittämättömällä versiolla (Lähde: Tanhuanpää ym. 2024.)

Päivitetyn työkalun antamat tulokset kahdelle metanolipolttoaineelle (valmistettu maakaasusta ja biomassasta) sekä biokaasulle on esitetty ympäristöindeksin osalta kuvassa 4. Jokaisen polttoainevaihtoehdon kohdalla on kolme pylvästä, jolloin GWP100-potentiaalin muutos riippuen fossiilisista tai biologisista lähteistä hiilidioksidissa on selkeämpi käsittää. GWP tot. -palkissa kyseisen polttoainevaihtoehdon hiilidioksidipäästöt ovat erittelemättömät. GWP comp. -palkissa hiilidioksidipäästöt on jaoteltu biologisista ja fossiilisista lähteistä oleviin päästöihin. GWP foss. -palkissa on ainoastaan fossiilisista lähteistä oleva hiilidioksidi. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa siis käytännössä oletetaan, että biologisista lähteistä oleva hiilidioksidi ei lämmitä ilmastoa suljetun hiilikierron ansiosta. Tämä oletama luonnollisesti edellyttää, että suljettu hiilikierto todella toteutuu myös käytännössä.

Näiden kaikkien kolmen vaihtoehdon arvioidut tuotannonaikaiset päästöt perustuvat Brynolfin tutkimusryhmän julkaisemaan artikkeliin (Brynolf ym. 2014) ja käytönaikaiset päästöt IMO 4<sup>th</sup> GHG Study -dokumenttiin (IMO 2020). Näissä lähteissä julkaistujen lähtöarvojen perusteella myös biopolttoaineilla on fossiilista GWP-vaikutusta juuri tuotannonaikaisiin päästöihin perustuen. Tämän takia ympäristöindeksi-arvo nouseekin varsin korkeaksi biometanolilla ja myös LBG:llä verrattuna maakaasusta tuotettuun metanoliin. Toisaalta on syytä muistaa, että maakaasusta tuotetun metanolin päästöt GWP-vaikutuksen osalta ovat ja tulevat olemaan fossiilisesta lähteestä olevaa hiilidioksidia, siinä missä biovaihtoehtojen tuotantoprosessia kehittämällä päästöjen vähentäminen voi onnistua huomattavastikin.

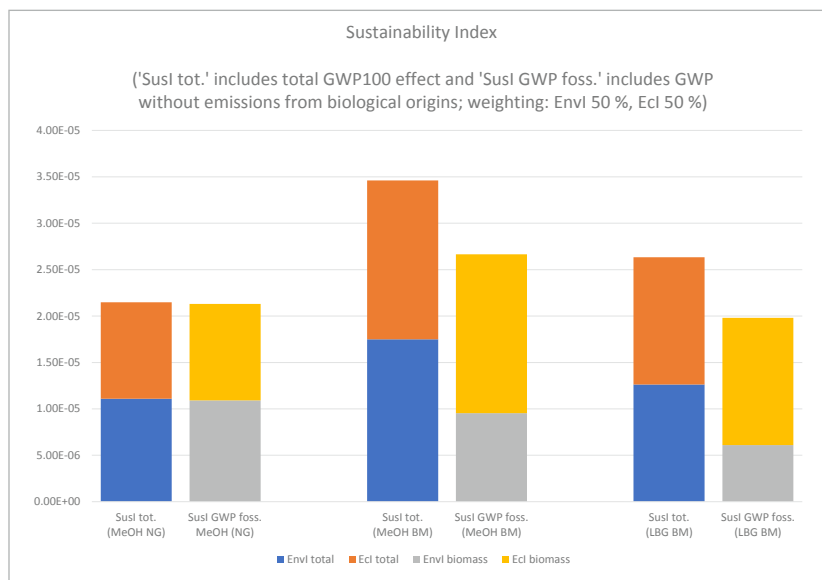
Mikäli suljetun hiilikierron periaate jää kuitenkin tavoittamatta esimerkiksi kestävämmän maankäytön tai muiden syiden perusteella, voivat biovaihtoehdot olla GWP-vaihtelukseltaan jopa huonompia: Tuolloin hiiltä vapautuu ilmakehään polttoaineen käytöstä ja ennen kaikkea tuotantoprosessista, jolloin kokonaismäärä voi hyvinkin ylittää fossiilisen vaihtoehdon tuottaman hiilidioksidikuormituksen. Lisäksi tuolloin ympäristöä todennäköisesti merkittävästi kuormittaa myös aiheutettu luontokato eliöiden elinympäristöjen tuhoutumisen seurauksena, vaikka tätä ei työkalu mallinnakaan. Biovaihtoehdot ovat siis lähtökohtaisesti hyviä, mutta systeemin kokonaiskestävyyteen on syytä kiinnittää huomiota.



Kuva 4. Päivitetyllä työkalulla laskettu ympäristöindeksi kahdelle metanolipolttoaineelle ja biokaasulle (Lähde: Tanhuanpää ym. 2024.)

Kestävyysindeksit kuvan 4 polttoainevaihtoehdoille on esitetty kuvassa 5, joka sisältää kokonaiskestävyyksindeksin ja eriteltynä fossiilisista lähteistä olevat, GWP100-potentiaaliin vaikuttavat hiilidioksidipäästöt. Näille polttoaineille ei ole vielä kehittynyt vakiintuneita markkinoita (lukuun ottamatta fossiilista metanolia). Valituilla polttoaineiden hinnoilla on suuri vaikutus talousindeksiin, mutta markkinoiden käytännössä puuttuessa hintaestimaatteina käytetään kirjallisuudessa esitettyjä tuotantokustannusarvioita. Tässä esimerkissä hintatasoksi on valittu maakaasusta valmistetulle metanolille 276 €/t (Solakivi ym. 2022), biomassametanolille 552 €/t (Solakivi ym. 2022) ja biokaasulle 976 €/t (Hansson ym. 2019; Solakivi ym. 2022). Metanolin alhaisemman energiasisällön takia sitä käytännössä kuluu noin kaksi kertaa enemmän verrattuna biokaasuun,

mikä on syytä noteerata puhuttaessa toteutuneista polttoainekustannuksista. Toisaalta metanolimoottoreiden etuna on polttoainejärjestelmän yksinkertaisempi rakenne, kun taas nesteytetty metaanikaasu on säilöttävä vähintään -163 °C:n lämpötilassa, mikä vaatii polttoainejärjestelmältä kokonaisuudessaan erityisratkaisuja. Lisäksi nesteytetyn kaasun säilyvyys edellyttää polttoaineen riittävää kiertoa säiliöissä.



Kuva 5. Päivitetyllä työkalulla laskettu kestävyysindeksi kahdelle metanolipolttoaineelle ja biokaasulle (Lähde: Tanhuanpää ym. 2024.)

## Pohdinta

Tarkasteltaessa kuvien 2–5 tuloksia elinkaarikestävyysoäkalun tarkoitus ja tarve tulee hyvin esille. Usein etenkin julkisuudessa asioita helposti yksinkertaistetaan ja jokin vaihtoehto voidaan esittää näennäisen helpo-pona ratkaisuna saavuttaa asetetut tavoitteet. Mikäli tällaisia helppoja ratkaisuja olisi olemassa, ne todennäköisesti olisi otettu käyttöön jo ajat sitten. Myös kestävyysindeksimenetelmä luonnollisesti yksinkertaistaa asioita, mutta sen avulla saadaan päätöksenteon tueksi numeerisia arvoja, jolloin erilaisten kombinaatioiden keskinäinen vertailu on inhimillisesti helpompaa. Jokaisessa lähestymistavassa käyttäjän on kuitenkin syytä ymmärtää laskennan lähtötietojen ja valittujen menetelmien vaikutus lopputulokseen ja tarkastella tuloksia tästä näkökulmasta käsin.

Kahdessa (Xamkin) hankkeessa (MEPTEK ja MERPOL) on kehitetty kestävyysindeksiin perustuvat laskenta-alustat aluksille, jotka hyödyntävät

raskasta tai kevyttä polttoöljyä, fossiilista tai bioperäistä nesteytettyä kaasua ja maakaasusta tai biomassasta valmistettua metanolia. Perinteisiä öljypolttoaineita käytettäville aluksille on työkalussa mahdollista valita useita päästövähennystekniikoita, joilla negatiivisia ympäristövaikutuksia voidaan vähentää. Uusien polttoaineratkaisujen, kuten metanolin, yhtenä haasteena on arvioida käytönaikainen todellinen päästötaso ja mahdollisten päästövähennystekniikoiden toteutuva tehokkuus meriolo-suhteissa. Näistä avoimesti saatavilla olevaa dataa on toistaiseksi hyvin rajoitetusti, koska näiden vaihtoehtoratkaisujen määrä aluksissa on toistaiseksi hyvin marginaalinen.

Sama ongelma koskee polttoainevaihtoehtojen tuotannon aikaisia päästöjä, jotka monissa uusiutuviissa polttoaineratkaisuissa voivat olla hyvinkin merkittävässä asemassa ratkaisun kokonaisu ympäristökestävyyden kannalta. Koska monia polttoaineita voidaan tuottaa usealla eri menetelmällä ja nykyiset tuotantomäärät eivät mitenkään riitä täyttämään oletettua tarvetta tulevaisuudessa, mahdollinen siirtymä näihin ratkaisuihin edellyttää tuotantomäärien merkittävää lisäystä. Olisi toivottavaa, että investoinnit kohdistuisivat tuolloin suoraan kestäviin tuotantoratkaisuihin. Näin ei kuitenkaan automaattisesti tapahdu, etenkin mikäli ympäristölle haitallisemmat ratkaisut ovat taloudellisesti huomattavasti edullisempia toteuttaa tai mikäli käsitys siitä, mikä menetelmä on aidosti kestävä pitkällä aikavälillä, on ristiriitainen.

Taloudellinen kestävyys helposti yksinkertaistetaan vain yksittäisen toimijan kyvyksi toimia. Käytännössä asia on kuitenkin monimutkaisempi: Mikäli kustannukset kasvavat ja palvelun hintataso nousee, tällä voi olla usein moninaisia kerrannaisvaikutuksia. Tämä vaikutus helposti kiihdyttää inflaatiota ja herättää tyytymättömyyttä, joka voi lisätä poliittista painetta etsiä keinoja hintatason laskemiseksi. Tuolloinkin asiat poliittisessa debatissa usein yksinkertaistuvat ja voivat ilmetä muun muassa ympäristölainsäädännön keventämisenä, mikäli kyseinen lainsäädäntö rajoittaa halvempien ratkaisujen hyödyntämistä. Erityisesti taloudellisesti merkittävät investoinnit edellyttävät riittävän vakaita näkymiä investoinnin tuottamille hyödyille, mitä tällainen lainsäädännön veivaaminen ei tue. Näin on siis demokratioissa, minkä lisäksi on syytä muistaa, että vähemmän demokraattisissa maissa kansalaisille ”sovelias” hintataso kriittisissä asioissa (kuten polttoaineissa) on yksi menetelmä pitää kansa rauhallisena ja saada näin hiljaista tukea muutoin yksinvaltaisesti toimivalle hallinnolle. Muun muassa näiden tekijöiden vuoksi taloudellinen kestävyys on yhtä lailla merkittävä asia kokonaiskestävyyttä tarkasteltaessa ympäristökestävyyden lisäksi.

Öljymäiset biopolttoaineet ja ammoniakki ovat myös polttoaineita, joita on esitetty meriliikenteen tulevaisuuden polttoaineratkaisuiksi. Biopolttoaineita on tarjolla jo valmiina tuotteina, tosin tuotantomäärät ovat globaalisti varsin vähäisiä. Ammoniakkimoottoreita kehitetään, ja moni valmistaja onkin luvannut valmiita tuotteita markkinoille lähivuosina. Muun muassa Wärtsilä on ilmoittanut lanseeranneensa ensimmäisen kaupallisen ammoniakkimoottorin (Navigator Magazine 2023). Käytännössä ammoniakkia polttoaineena käyttäviä aluksia ei kaupallisessa liikenteessä toistaiseksi vielä juurikaan ole; tilauskirjoissa niitä muutamia kuitenkin jo on (DNV 2024, 19–24). Tulevaisuudessa olisi perusteltua päivittää kestävyysindeksityökalu huomioimaan nämä polttoaineratkaisut. Tuolloin työkalu olisi varsin laajasti käytettävissä tarkasteltaessa erilaisia meriliikenteen nykyisiä ja tulevia polttoainevaihtoehtoja. Lähtöarvoja muuttamalla olisi kokonaisvaikutuksia selkeä tarkastella kestävyysindeksiin perustuen. Kenties suurin este tässä on se, että ei ole saatavilla avointa dataa ratkaisuista, jotka ovat toistaiseksi meriliikenteessä vielä hyvin marginaalisia.

# LÄHTEET

Aakko-Saksa, P., 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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>.

Acar, C. & Dincer, I. 2019. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *Journal of cleaner production* 218, 835–849. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046>.

Bengtsson, S., Andersson, K. & Fridell, E. 2011. Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion. Gothenburg: Chalmers university of technology.

Bouman, E., Lindstad, E., Riialand, A. & Strømman, A. 2017. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation research part D: transport and environment* 52, 408–421. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>.

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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.052>.

Centrum voor Milieukunde Leiden. 2016. CML-IA Characterization Factors. WWW-dokumentti. Saatavissa: [www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors](http://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors) [viitattu 19.9.2024].

Chountalas, T., Founti, M. & Tsalavoutas, I. 2023. Evaluation of biofuel effect on performance & emissions of a 2-stroke marine diesel engine using on-board measurements. *Energy* 278, 127845. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127845>.

DNV. 2024. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2024. Hamburg: DNV AS.

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2015/757.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/959.*

Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesieme, U., Pazouki, K. & Murphy, A. 2018. Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels. *Journal of cleaner production* 172, 855–866. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.165>.

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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>.

Iannaccone, T., Landucci, G., Tugnoli, A., Salzano, E. & Cozzani, V. 2020. Sustainability of cruise ship fuel systems: Comparison among LNG and diesel technologies. *Journal of cleaner production* 260, 121069. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121069>.

*International maritime organization [IMO].* 2020. Fourth IMO GHG study 2020. London: International maritime organization.

Ishaq, H., Dincer, I. & Crawford, C. 2022. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International journal of hydrogen energy* 62, 26238–26264. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.149>.

*Navigator magazine.* 2023. Wärtsilä esitteli maailman ensimmäisen ammoniakilla toimivan nelitahtimoottoriratkaisun. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://navigatormagazine.fi/uutiset/meriteollisuus/wartsila-esitteli-maailman-ensimmaisen-ammoniakilla-toimivan-nelitahtimoottoriratkaisun/> [viitattu 20.9.2024].

Nikolaidis, P. & Poullikkas, A. 2017. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and sustainable energy reviews* 67, 597–611. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>.

*Rahiala, S.* 2022a. Päästövähennysmenetelmien elinkaari- ja ympäristökustannusanalyysi. Teoksessa Altarriba (toim.) Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTek-hankkeen loppuraportti. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

*Rahiala, S.* 2022b. Päästövähennysmenetelmien taloudellisen ja ympäristösuorituskyvyn vertailu. Teoksessa Altarriba (toim.) Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTek-hankkeen loppuraportti. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

*SFS-EN ISO 14044:en.* Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (ISO 14044:2006).

*Solakivi, T., Paimander, A. & Ojala, L.* 2022. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation research part D: transport and environment* 113, 103500. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>.

*Tadros, M., Ventura, M. & Guedes-Soares, C.* 2023. Review of current regulations, available technologies, and future trends in the green shipping industry. *Ocean engineering* 280, 114670. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114670>.

*Tanhuanpää, T., Altarriba, E. & Rahiala, S.* 2024. Transition towards fossil-free energy sources in the shipping sector: a sustainability index analysis of methanol and liquefied biogas. 7<sup>th</sup> *Conference on sustainable mobility*, 4–6 September, Karditsa, Greece.

# POLTTOAINEVAIHTOEHTOJEN TCO-TYÖKALU

Elias Altarriba



© Elias Altarriba

Kokonaiskustannusajattelulla (TCO, total cost of ownership) tarkoitetaan lähestymistapaa, jossa arvioidaan hankinnan tai investoinnin kokonaiskustannuksia (Ellram 1993, 2–11). Lähestymistavassa pyritään mallintamaan investointipäätöksen todelliset, elinkaaren aikaiset kokonaiskustannukset mahdollisimman todenmukaisesti käytettävissä olevin tiedoin. Erityisesti suuruusluokaltaan merkittävien hankintapäätösten kokonaiskustannusten selvittely on osoittautunut oleelliseksi tavaksi ehkäistä virheinvestointeja (Ellram 1995, 4–23). Malleihin sisältyy kuitenkin merkittävästi epävarmuutta silloin, kun investoinnin elinkaari on pitkä (Ferrin & Plank 2002, 18–29). Monet kustannukset ovat sellaisia, joiden taso voi vuosikymmenien kuluessa muuttua merkittävästi. Lisäksi markkinaympäristö monilla aloilla on joka tapauksessa hyvin dynaaminen.

TCO-mallintaminen riippuu aina mallinnettavasta kohteesta (Ellram 1993, 2–11; Ellram 1995, 4–23). Yleisperiaate on kuitenkin varsin yksinkertainen. TCO-mallissa kustannukset jaetaan karkeasti ottaen neljään osaan:

- hankintaprosessin kustannukset
- investointikustannukset
- operatiiviset kustannukset
- käytön lopettamiseen liittyvät kustannukset.

Hankintaprosessiin liittyvät kustannukset tarkoittavat kokonaiskustannuksia, jotka syntyvät prosessin elinkaaritarkastelussa ennen varsinaista investointipäätöstä. Suuruusluokka vaihtelee merkittävästi: pienhankinnoissa prosessi on usein varsin suoraviivainen ja edullinen, mutta erityisesti tyypeiltään uniikeissa ja taloudellisesti merkittävässä investoinneissa prosessi voi muodostaa merkittävän kuluerän. Alusinvestoinnit kuuluvat ilman muuta varustamolle isoihin hankintoihin. Tilanteen mukaan hankintaprosessin kustannuksiin kuuluvat ainakin oman organisaation työntekijöiden hankintaprosessin edistämiseen käyttämä työaika, mahdolliset matkakulut tai hankintaprosessin hallinnolliset kustannukset sekä prosessissa tarvittavat ostopalvelut ja ulkoistamiset (Stavroulakis & Papadimitriou 2022, 1–14). Erityisesti suurissa hankintaprosesseissa piilokulujen osuus voi muodostua merkittäväksi. Esimerkiksi prosessiin saatetaan virallisesti allokoida vain yhden henkilön muutaman kuukauden työaika, mutta aliresursoituna hän joutuu turvautumaan laajasti muiden työntekijöiden apuun, jolloin todelliset henkilökulut ovat huomattavasti suuremmat. Tämä korostuu erityisesti, mikäli tämän seurauksena näiden muiden työntekijöiden omat työprosessit häiriintyvät huomattavalla tavalla.

Investointikustannuksilla tarkoitetaan varsinaisen hankinnan realisoitunutta hintaa. Yksinkertaisissa hankinnoissa investointikustannukset on yleensä varsin helppo määrittellä. Erityisesti erilaisissa rakentamista tai räätälöityä tuotantoa vaativissa projekteissa lopulliset kustannukset ovat kuitenkin selvillä vasta, kun tavoitteet on saavutettu. Investointikustannusten hallitsemiseksi tuottajan ja hankkijan välisen sopimuksen sisältö on oleellisessa asemassa. Mahdollisten rahoitusjärjestelyjen kustannukset ja etenkin kansainvälisissä hankinnoissa valuuttakurssien vaihtelu on huomioitava investointikustannuksissa. Lisäksi pitkät alihankintaketjut ja niissä tapahtuvat muutokset voivat tuottaa odottamattomia yllätyksiä. (Keane ym. 2017, 41–57.)

Operatiiviset kustannukset muodostuvat käytön aikaisista kustannuksista. Meriliikenteessä näitä ovat muun muassa henkilöstökulut, polt-

toainekustannukset, erilaiset verot ja veroluontoiset maksut, alusten käytönaikaiset huollot ja määräaikaistelakoinnit sekä muut vastaavat kustannuserät (Stavroulakis & Papadimitriou 2022, 1–14). Näkökulmasta riippuu, miten esimerkiksi elinkaarenaikaisiin muutostarveinvestointeihin suhtaudutaan: lasketaanko ne osaksi aluksen elinkaaren aikaisia operatiivisia kustannuksia vai ajatellaanko ne erillisinä investointeina? Molemmat lähestymistavat ovat perusteltuja eri tilanteissa.

Käytön lopettamiseen liittyvät kustannukset tarkoittavat kuluja, jotka muodostuvat elinkaaren lopussa. Suuruusluokka voi olla hyvinkin merkittävä, mikäli tarkasteltavalla kokonaisuudella ei ole järkevää jatkokäyttöä ja siitä eroon pääseminen hallitusti ja hyväksytysti vaatii erikoistoimenpiteitä. Aluksista puhuttaessa jatkokäyttö on keskeisessä asemassa: mikäli varustamo löytää alukselleen ostajan, voivat myyvän osapuolen käytön lopettamiseen liittyvät kustannukset olla vähäisiä. Toisaalta ostavan osapuolen näkökulmasta niiden suhteellinen osuus voi muodostua merkittäväksikin, mikäli alus alkaa joka tapauksessa olla elinkaarensa loppupuolella. Hankalaksi asia muodostuu, mikäli TCO-tarkastelussa keskitytään yksittäisiin, aluskohtaisiin, mutta silti merkittäviin investointeihin. Esimerkiksi elinkaarensa päättäneille rikkipesureille ei todennäköisesti ole olemassa järkevää jatkokäyttöä. (Choi ym. 2016, 82–91.)

## Kustannusanalyysityökalu (eli TCO-työkalu)

MERPOL-hankkeessa luotiin Excel-pohjainen työkalu (vastedes “TCO-työkalu”), jonka avulla käyttäjä voi arvioida meriliikenteen eri polttoainetyyppien elinkaaren aikaisia kustannuksia. Kustannukset voi laskea yhtä aikaa useammalle alukselle. Oletusarvoisesti työkalu mahdollistaa enintään kymmenen aluksen tarkastelun sisällytettynä samaan aluspöoliin (eli FuelEU Maritime -säädöksessä määriteltyyn laivastoon, jonka on täytettävä vaaditut hiili-intensiteettivaatimukset yhteisvastuullisesti), mutta tarpeen vaatiessa tätä määrää on mahdollista manuaalisesti kasvattaa. TCO-työkalun alusvälilehdille syötetään tai valitaan valikosta lähtöarvoja kokonaiskustannusten laskemiseksi. Näitä lähtöarvoja ja -valintoja ovat esimerkiksi aluksen tai alusten käyttämä polttoainetyyppi tai -tyypit, polttoainekulut ja muut operointikustannukset sekä pääomakustannukset. Käyttäjä voi hyödyntää Excelissä valmiina olevia lähtöarvoja tai omia arvoja, jos hänellä on tarkempaa tietoa operointi- ja muista kuluista. Valmiina olevat lukuarvot ovat tutkimuskirjallisuuteen perustuvia estimaatteja. Lähtöarvot ja työkalun laskenta on selitetty tarkemmin seuraavassa lu-

vussa (TCO-työkalun rakenne). Kokonaiskustannuslaskennan tulokset esitetään työkalun pääsivulla (Fleet pooling -niminen välilehti). Lisäksi aluskohtaisia tuloksia voi tarkastella aluskohtaisilla välilehdillä (nimeltään Ship1, Ship2, Ship3 jne.).

Työkalun avulla voi myös tarkastella, täyttääkö alus tai alukset FuelEU Maritime -asetuksen vaatimukset valituilla polttoainevaihtoehdoilla. FuelEU Maritime velvoittaa vähentämään EU:n alueella liikennöivien alusten kasvihuonekaasuintensiteettiä eli sitä, paljonko kasvihuonekaasupäästöjä (KHK) syntyy polttoaineen energiayksikköä kohti. Vuonna 2025 voimaan astuva asetus määrittää aluksille KHK-intensiteettirajat, jotka kiristyvät viiden vuoden välein. (EU/2023/1805.) TCO-työkalu laskee siis kustannusten lisäksi yksittäisen aluksen tai alusten yhteenlasketun KHK-intensiteetin valituilla polttoaineilla. Kuten kustannukset myös nämä tulokset esitetään Fleet pooling -välilehdellä sekä aluskohtaisilla välilehdillä.

## TCO-työkalun rakenne

Kuten edellä on todettu, mallin pääsivu eli tulossivu (Fleet pooling -välilehti) luo yhteenvedon työkaluun syötettyjen alusten KHK-intensiteeteistä ja polttoainekustannuksista. Oletusarvoksi on asetettu kymmenen alusta siten, että aluskohtaisia välilehtiä on kymmenen. Aluskohtaisille välilehdille (nimiltään Ship1, Ship2, jne.) syötetään kutakin alusta koskevat alkuarvot, kuten aluksen käyttämä polttoainetyyppi tai -tyypit sekä niitä koskevat kustannusarvot. Tarvittaessa alusten määrää on helppo vähentää valitsemalla yksittäiselle alukselle polttoaineratkaisuksi N/A. Alusmäärän lisääminen on myös mahdollista, mutta se edellyttää alusten manuaalista lisäystä malliin. Uuden aluksen manuaalinen lisäys työkaluun tapahtuu käytännössä luomalla uusi välilehti, kopioimalla välilehdelle toisen alusvälilehden solujen sisältö koodeineen ja lisäämällä Fleet pooling -välilehdelle uusi alusrivi kopioituine koodeineen. (Yksityiskohteisemmat selitykset löytyvät kohdasta *Aluskohtaiset välilehdet*.)

## TCO-mallin pääsivu (Fleet pooling -välilehti)

TCO-mallin pääsivulle on koostettu alusten KHK-intensiteetti-indeksit, valitut polttoaineratkaisut (max. 3 kpl/alus) sekä lähtöarvojen perusteella lasketut elinkaaren aikaiset polttoainekulut, jotka sisältävät myös mahdolliset päästökauppamaksut. Lisäksi välilehdellä esitetään viimeinen

päiväys, johon asti alus tai aluskombinaatio voi operoida valituilla polttoaineratkaisuilla täyttäen FuelEU Maritime -asetuksen (EU/2023/1805) KHK-intensiteettivaatimukset. Nämä raja-arvot on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** FuelEU Maritime -asetuksen kasvihuonekaasuintensiteetin vähentämisvaatimukset ja voimaanastumispäivät.

Voimaanastumispäivämäärä	Kasvihuonekaasuintensiteetin vähennys
1.1.2025	2 %
1.1.2030	6 %
1.1.2035	14,5 %
1.1.2040	31 %
1.1.2045	62 %
1.1.2050	80 %

ALT-TEKSTI: Taulukossa on lueteltu FuelEU Maritime -asetuksen kasvihuonekaasuintensiteetin vähentämisvaatimukset ja voimaanastumispäivät. Rajat kiristyvät vuodesta 2025 alkaen viiden vuoden välein rajojen ollessa 2 %, 6 %, 14,5 %, 31 %, 62 % ja 80 %.

KHK-indeksi on jaettu työkalussa kahteen sarakkeeseen: GHG Index 2025–2033 ja GHG Index 2034. Sarakkeessa (GHG Index 2025–2033) huomioidaan erityiskerros eli käytännössä väliaikainen helpotus, jonka FuelEU Maritime on asettanut RFNBO-polttoaineille (Renewable fuels of non-biological origin eli uusiutuvat, ei-biologisesta lähteestä peräisin olevat polttoaineet). Väliaikainen helpotus päättyy vuonna 2034. (EU/2023/1805.)

Kuten edellä on mainittu, FuelEU Maritime (EU/2023/1805) velvoittaa vähentämään alusten käyttämän energian kasvihuonekaasuintensiteettiä. Vertailuarvona käytetään EU-alueella vuonna 2020 operoineiden alusten keskimääräistä KHK-intensiteettiä (91,16 g hiilidioksidiekvivalenttia/MJ). Vuonna 2025 alusten KHK-intensiteetin on oltava enintään 89,3368, mikä tarkoittaa kahden prosentin vähenemää vuoden 2020 vertailutasosta. Nämä raja-arvot ja niitä vastaavat niin kutsutut päästövähenemäprosentit kiristyvät viiden vuoden välein vuoteen 2050 asti (ks. välilehti technical slide). FuelEU Maritime -asetusten veloitteiden täyttämiseksi varustamot voivat muodostaa omistamallaan aluksilla niin kutsuttuja aluspoolia (englanniksi fleet pool). Muodostetulle aluspoolille lasketaan yhteenlaskettu KHK-indeksi, jonka on täytettävä FuelEU Maritimen asettama raja-arvo. Tällöin osa aluspoolissa olevista, esimerkiksi

vanhemmista, aluksista voi ylittää raja-arvon, kunhan tämä raja-arvon ylitys kompensoituu muiden pooliin kuuluvien alusten avulla. Käytännössä tämä edellyttää, että kompensoivat alukset alittavat vaaditun KHK-intensiteetin selkeästi (EU/2023/1805). Tämä tukee vahvasti investointeja matalan KHK-intensiteetin aluksiin, kun varustamo voi hyötyä investoinnistaan paitsi aluskohtaisesti myös aluspoolikohtaisesti.

TCO-työkalussa alukset muodostavatkin aluspoolin, jonka KHK-indeksi ja laskettu päästövähennäprosentti on ilmaistu alustaulukon alla (ks. kuva 1). Pääsivun alin taulukko muodostaa koosteen siitä, mihin asti valitulla aluspoolilla on mahdollisuus operoida FuelEU Maritime -asetuksen vaatimusten puitteissa (ks. rivit "Fleet acceptance" ja "Year" kuvassa 1). Sama taulukko sisältää vuosikohtaisen suurimman sallitun KHK-intensiteettiarvon ja laskennallisen säädöksessä EU/2023/1805 määritellyn FCB-arvon (fleet compliance balance), jonka perusteella määritellään mahdollinen sakko FuelEU Maritimen säädösten täyttämättä jättämisestä. Malli ei huomioi 20. artiklan mukaista vaatimustenmukaisuusylijäämän säästämistä ja lainaamista, vaan tämän on käyttäjän huomioitava tarvittaessa omaehtoisesti. Lisäksi käyttäjän on syytä muistaa säästämiseen ja lainaamiseen liittyvät rajoitteet (2 %:n enimmäismäärä, enintään kaksi peräkkäistä raportointikautta). TCO-mallin pääsivu (fleet pooling) on esitetty kuvassa 1.

#### GHG-intensity pool

	GHG Index 2025-2033	GHG Index 2034	ME Fuel 1	ME Fuel 2	ME Fuel 3	Fuel+ETS costs	Due date
Ship 1	91,74	91,74	HFO (RME-RMK)	N/A	N/A	8010446	1 Jan 2025
Ship 2	35,59	35,59	Bio-methanol	N/A	N/A	10520000	1 Jan 2040
Ship 3	30,18	45,14	LNG (Otto, dual fuel med)	Bio-LNG (Bio-methane)	N/A	17520000	1 Jan 2040
Ship 4	75,08	75,08	LNG (Diesel, dual fuel slow)	N/A	N/A	7691141	1 Jan 2035
Ship 5	46,20	46,20	HVO (70%)	N/A	N/A	10520000	1 Jan 2040
Ship 6	90,77	90,77	MDO/MGO	N/A	N/A	12097846	1 Jan 2025
Ship 7	51,98	51,98	Biodiesel (70 %)	N/A	N/A	12380000	1 Jan 2040
Ship 8	89,20	89,20	LNG (Otto, dual fuel med)	N/A	N/A	8379891	1 Jan 2025
Ship 9	89,20	89,20	LNG (Otto, dual fuel med)	N/A	N/A	8379891	1 Jan 2025
Ship 10	89,20	89,20	LNG (Otto, dual fuel med)	N/A	N/A	8379891	1 Jan 2025
Amount of ships	10	10					
	GHG Index 2025-2033	GHG Index 2034					
Fleet GHG-index	69,02	70,51					
Reduction percent	24,74	23,11					
Year	2025	2030	2034	2035	2040	2045	2050
Fleet acceptance	Allowed	Allowed	Allowed	Allowed	Not allowed	Not allowed	Not allowed
FuelEU (%)	2	6	6	14,5	31	62	80
GHG Intensity index	89,87	86,20	86,20	78,40	63,27	34,85	18,34
Fleet compliance balance (gCO2 eq.)	93858558821,05	77347056821,05	70615424110,34	35528482360,34	-32581463389,66	-160545603889,66	-234847362889,66
Penalty fee (€)	No fee	No fee	No fee	No fee	27634485,2	136169301,8	199189517,8

Kuva 1. TCO-mallin pääsivu.

## Aluskohtaiset välilehdet

Aluskohtaiset sivut ovat keskenään identtiset, ja näiltä sivuilta valitaan aluskohtaiset lähtöarvot. Polttoainevaihtoehtoja voidaan valita kolme kappaletta pääkoneille, apukoneille, boilerille, polttokennoille ja jätepolttajärjestelmille. Pää- ja apukoneille sekä boilerille voidaan valita kaikki käytettävissä olevat polttoainevaihtoehdot. Polttokennoille va-

linnat on rajattu eri raaka-aineista valmistettuihin vetypolttoaineisiin. Jätteenpolttajärjestelmille rajoituksia ei ole asetettu. Maasähköstä syötetään vain käytetty energiamäärä, mutta maasähkön alkuperään tai tuotannossa syntyviin päästöihin malli ei ota muuta kantaa. Polttoainetyypin valitsemisen lisäksi työkaluun on syötettävä polttoainetonneina toteutunut kulutus tarkasteluvuoden aikana. Työkalu laskee polttoainekustannukset sen perusteella, mitkä hinnat kullekin polttoainetyypille on syötetty polttoainetyyppivälilehdellä. Valintasolut on esitetty kuvassa 2.

OPEX

	Main engines	Auxiliary engines	Boilers	Fuel cells	Waste incinerators	Shore power
Fuel type 1	HFO (H/MC/HM)	N/A	N/A	N/A	N/A	Electricity
Consumed fuel 1 (annual)	10000 t	20 t	20 t	20 t	20 t	0 MWh
Fuel type 2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Consumed fuel 2 (annual)	600 t	0 t	0 t	0 t	0 t	
Fuel type 3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	
Consumed fuel 3 (annual)	0 t	0 t	0 t	0 t	0 t	
Total fuel costs	5000000 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a	0 €/a

Kuva 2. Aluksen polttoainevalinnat

Yhteenlasketut päästökaupparamaksut (ks. kuva 3) on eritelty aluskohtaisesti käyttäjän valitseman päästöoikeuden hinnan perusteella (syötetään malliin polttoainetyyppivälilehdellä). Malli laskee automaattisesti päästömaksujen kustannukset hiilidioksidille, metaanille ja typpioksiduulille. Käyttäjä voi kuitenkin valita, sisällytetäänkö päästömaksut normaalin käytännön mukaisesti aluksen operatiivisiksi kustannuksiksi vai haluaako hän tarkastella ainoastaan polttoaineen hankinnasta muodostuvia polttoainekustannuksia ilman päästömaksuja. Lisäksi mallissa nämä kaikki kolme mainittua päästötyyppiä (hiilidioksidi, metaani ja typpioksiduuli) voidaan määritellä kuuluvan päästömaksujen piiriin tai vaihtoehtoisesti tarkastelu voidaan kohdentaa ainoastaan CO<sub>2</sub>-päästöihin ETS include-rivillä. Maantieteelliseen kattavuuteen voidaan vaikuttaa valitsemalla Covering (MEXTRA) -valikosta ”MEXTRA100” (100 %:n kattavuus eli KHK-päästöt huomioidaan täysimääräisesti, koskee EU:n sisäistä liikennettä), ”MEXTRA50” (50 %:n kattavuus eli päästökauppaan kuuluu puolet matkan ajalta syntyneistä päästöistä, koskee liikennettä kolmansien maiden ja EU-maiden välillä) tai ”No ETS” (ei-EU-liikenne eli päästömaksuja ei sovelleta). Myös päästökaupan (ETS) vaiheittainen voimaantuminen on työkalussa huomioitu ja käyttäjän valittavissa (40 % alusten KHK-päästöistä kuuluu päästökaupan piiriin vuonna 2024, 70 % vuonna 2025 ja 100 % vuodesta 2026). Tämä valitaan riviltä ”Phase-in period (ETS)”. Lisäksi tietyille jääluokille (1A Super ja 1A) myönnetty määräaikainen helpotus koskee useita erityisesti Itämerellä liikennöiviä aluksia. Jäissäkulkupoikkeusta eli jäissä operoinnin vaatiman lisäenergiatarpeen hyvitystä malli ei kuitenkaan huomioi.

ETS CO2 costs	0	€/a	
ETS CH4 costs	0	€/a	
ETS N2O costs	0	€/a	
ETS Include			
Covering (MEXTRA)			
Phase in period (ETS)			
Ice class (1A Super & 1A) reduction (-5 %), until 31 Dec 2030			
	CO2, CH4 and N2O		
	MEXTRA100		
	After 2026		
	1A Super or 1A		
Total fuel+ETS costs	10520000	€/a	
Pwind/Pprop (%)	0		
	2025-2033		2034
GHG Intensity index, WtT	-35,90		-35,90
GHG Intensity index, TtW	71,49		71,49
GHG Intensity index	35,59		35,59
FuelEU maritime reduction per cent	61,18	%	61,18
FuelEU maritime compliance			
	Year	Aim	Reduct.
	2025	2	61,18
	2030	6	61,18
	2034	6	61,18
	2035	15	61,18
	2040	31	61,18
	2045	62	61,18
	2050	80	61,18
			Allowed
			Allowed
			Allowed
			Allowed
			Not allowed
			Not allowed
Due date	1 Jan 2040		

Kuva 3. Päästökauppaa (ETS) ja FuelEU Maritime -asetusta koskevat vaihtoehdot työkalussa aluskohtaisilla välilehdillä.

ETS-valintojen jälkeen työkalu laskee KHK-intensiteetti-indeksin kullekin alukselle FuelEU Maritimessa säädetyllä laskukaavalla (ks. kuvat 1 ja 3, joissa esitetään työkalun antamia tuloksia). FuelEU Maritime -asetuksen mukaan aluksen KHK-intensiteetti pienenee, jos aluksella on käytössä tuulivasteista käyttövoimaa. Työkalussa tämä huomioidaan siten, että käyttäjä voi itse valita tuulivasteisen käyttövoiman (0 %, 5 %, 10 %, 15 %) vähennysprosentin aluskohtaisesti rivillä Pwind/Pprop (%). Tuulivasteista käyttövoimaa koskevan valintarivin alla on esitetty työkalun laske- ma aluskohtainen KHK-intensiteetti (2025–2033 ja 2034 alkaen). Tässä kohdassa on eritelty polttoaineen valmistuksesta syntyvä KHK-intensiteetti (WtT, well to tank) ja käytöstä syntyvä KHK-intensiteetti (TtW, tank to wake). Näistä yhdessä muodostuu koko elinkaaren aikainen KHK-intensiteetti (rivillä “GHG intensity index”). Jaottelu vuosille 2025–2033 ja ajanjaksolle vuodesta 2034 eteenpäin (ks. kuva 3) johtuu siitä, että RFNBO-polttoaineisiin sovellettava väliaikainen helpotus päättyy vuoden 2033 lopussa. Väliaikainen helpotus määritellään RWD-kertoimen avulla, jota sovelletaan KHK-intensiteetin laskemisessa vuoteen 2034 asti. Muille polttoaineille tulokset ovat yhtenäisiä. KHK-indeksin lisäksi työkalun tulossivulla näkyy, kuinka paljon kyseinen vaihtoehto vähentää päästöjä verrattuna vuoden 2020 referenssitason. Lisäksi kuvan 3 alataulukossa esitetään kyseisen aluskombinaation yhteensopivuus FuelEU Maritime -säästöjen asettamien tavoitteiden kanssa.

## Pääomakustannuslaskenta ja Fuel types -välilehden sisältö

Aluksen pääomakustannuksia on mahdollista tarkastella kuvan 4 esittämissä taulukossa. Vaihtoehtoisesti käyttäjä voi jättää tämän tarkastelun tekemättä valitsemalla jokaiselle pääomakustannukselle moottorityypiksi (N/A). Mikäli tarkastelu halutaan tehdä, voidaan valitut moottorityypikombinaatiot ja niiden vaatimat pääomakustannukset määrittellä Capex table -välilehdellä. Kustannukset eritellään moottorityypin, polttoainejärjestelmän ja pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmien muodostamiin pääomakustannuksiin. Elinkaaren pituus on käyttäjän valittavissa samoin kuin kombinaation arvioitu jäännösarvo ja diskonttokorko. Pääomakustannukset lasketaan NPV (net present value) -menetelmällä kilowattia kohden. Myös vuosittaiset huolto- ja korjauskustannukset on mahdollista syöttää malliin, mutta se tehdään alus- ja moottorityypikohtaisesti rivillä ”annual maintenance and repairs”.

CAPEX	Diesel engine (P/O fuel system)	Diesel engine (M/GO fuel system)	Gasoline gas boiler	Fuel cell 1	Incinerator 1	N/A
Engine type	250	300	3	600	5	N/A
Engine (system) costs (€/kW)	250	300	3	600	5	N/A
Storage costs (€/kW)	60	60	0	500	3	0
Abatement system costs (€/kW)	13	13	0	0	0	0
Planned life cycle	25	25	25	25	25	25
Expected residual value (%)	10	10	10	10	10	10
Discount rate (%)	8	8	8	8	8	8
CapEx (NPV)	117.88	248.03	1.85	1075.95	7.82	0.00
CapEx (annual)	12.72	10.76	0.08	43.04	0.31	0.00
Annual maintenance & repairs	0	0	0	0	0	0

Kuva 4. Aluksen pääomakustannukset

Eri polttoainevaihtoehtoihin liittyvät oletusarvot syötetään työkaluun Fuel types -välilehdelle. Taulukko sisältää listan polttoainevaihtoehtoja, jotka ovat valittavissa aluskohtaisesti alusvälilehdillä. Polttoainevaihtoehtot, joiden käytöstä on maksettava päästömaksuja, on ryhmitelty ”ETS-obligated fuels” -kategoriaan. Vastaavasti ETS-vapauden ehdot täyttävät biopolttoaineet on ryhmitelty omaan kategoriaan samoin kuin RFNBO-polttoaineet. ETS-vapaus tarkoittaa sitä, että päästöoikeuksia ei tarvitse hankkia päästöille. Tätä poikkeusta sovelletaan esimerkiksi tiettyihin biopolttoaineisiin, joiden raaka-aineet ovat peräisin kestävästä lähteistä. Kestävät raaka-aineet on määritelty direktiivissä EU/2023/2413. Mikäli käyttäjä lisää taulukkoon omia polttoaineita tai tarkastelee esimerkiksi sellaista biopolttoainevaihtoehtoa, joka ei täytä ETS-vapauden ehtoa, on vaihtoehto sijoitettava ”ETS-obligated fuels” -kategoriaan, vaikka muut vaihtoehtot listassa ovatkin fossiilisia polttoaineita. Sarakkeista löytyvät polttoaineille mahdollisesti myönnettävät RWD-kertoimet ja polttoaineiden hintatiedot. Polttoaineiden hinnat syötetään tonnia kohden, mistä muunnos tehdään automaattisesti kustannuksiksi ekvivalenttitonnia tai megawattituntia kohden. Polttoaineiden hinnat ovat laskennassa ratkaisevan tärkeitä ja käyttäjän valittavissa. Default-arvoiksi on valittu



oikein. Mikäli mainitun kaltaiset seospolttoaineet yleistyisivät voimakkaasti, voisi olla perusteltua kehittää työkalua lisäämällä siihen rivit, jotka huomioisivat seospolttoaineet suoraan.

Näiden lisäksi polttoainevälilehti sisältää taulukon polttoainekohtaisista LCV- ja E-luvuista sekä päästökertoimista. LCV on polttoaineen energiasisältö (englannin kielen sanoista Lower Calorific Value). Erityisesti vertailtaessa mahdollisia tulevaisuuden polttoaineratkaisuja nykyisiin on LCV-arvoon erittäin tärkeää kiinnittää huomiota. Mikäli moottorin hyötysuhde pysyy samana, energiasisällöltään matalampaa polttoainetta kuluu määrällisesti enemmän, mikä vaikuttaa suoraan absoluuttisiin päästömääriin sekä polttoainekustannuksiin. E-luku liittyy biopolttoaineiden kokonaiskestävyyteen ja se määrittää polttoainekohtaisesti EU-direktiivin 2018/2001 liitteiden 5C ja 6B määritelmien ja RED III (2023/2413) -direktiivien perusteella riippuen tuotantomenetelmistä ja muista direktiiveissä määritellyistä asioista. Päästökertoimet noudattavat FuelEU Maritimen määritelmiä. CO<sub>2</sub>-ekvivalenttipäästöt on määritelty erikseen polttoainetyyppikohtaisesti tuotannonaikaisiin (well-to-tank) ja käytönaikaisiin (tank-to-wake) päästöihin. Huomioitavat kasvihuonekaasupäästöt ovat hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O). Lisäksi metaanivuodot määrittää erikseen nesteytetyille kaasuille (sarakeessa nimeltä Cslip).

FuelEU Maritime -direktiivin määritelmän mukaisesti osa päästökertoimista on sellaisia, joissa varustamon on mahdollista käyttää taulukkoarvoa ”parempia” eli pienempiä arvoja, mikäli sellaisia on todennetusti ja dokumentoidusti saatavilla (EU/2023/1805). Esimerkiksi metaanivuodot ja monien polttoaineiden osalta myös CH<sub>4</sub> ja N<sub>2</sub>O-päästöt kuuluvat tähän kategoriaan. Taulukkoon käyttäjä voi siis teknisestä näkökulmasta katsottuna vapaasti valita haluamansa päästökertoimet, mutta direktiivien määräykset on syytä huomioida, mikäli laskennan haluaa pitää lainmukaisena. Valinnanvapaus kuitenkin mahdollistaa työkalun paremman sovellettavuuden sääntöjen sallimissa puitteissa. Käytännössä koko asiakokonaisuus on kuitenkin sellainen, missä asiantuntemus on välttämättä oikeiden johtopäätösten tekemiseksi.

## Tulevaisuuden näkymät

Tässä artikkelissa on esitelty MERPOL-hankkeessa kehitetyn TCO-mallin toiminta yleisellä tasolla tarkastellen asiaa käyttäjän näkökulmasta. Mallin avulla osaava käyttäjä voi varsin helposti luoda erityyppisiä skenaarioita ja vertailla tuloksia keskenään. Suurin haaste liittyy kuitenkin

polttoainemarkkinoiden epävarmuuteen erityisesti uusien polttoaineratkaisujen osalta. Lainsäädäntö velvoittaa siirtymään pois fossiilisista polttoaineista, mutta toistaiseksi uusien polttoaineratkaisujen markkinat ovat vielä hyvin kehittymättömät, kun huomioidaan myös tuotantoketjut. Lisäksi erityyppisiä vaihtoehtoja fossiilisille polttoaineille on lukuisia, mikä monimutkaistaa ennustettavuutta entisestään. Tämä luo potentiaaliset olosuhteet polttoaineiden tuotannon ja kysynnän kohtaanto-ongelmille, mistä voi seurata voimakkaitakin hintavaihteluita. Markkinat eivät myöskään välttämättä ohjaa kohti parasta vaihtoehtoa: Taloushistoriasta löytyy lukuisia esimerkkejä, missä ominaisuuksiltaan vertailukohteita heikkomaisempi tuote on päässyt sopivissa olosuhteissa määräävään markkina-asemaan. Joissain tilanteissa tuote on voinut säilyttää tämän aseman yllättävän pitkäänkin.

Merimoottoreiden tuotekehityksessä ja uusien tuotteiden lanseerauksessa trendinä näyttäisi olevan monipolttoainemoottoriratkaisu, mikäli moottorin on haluttu toimivan muilla, kuin fossiiliseen öljyyn perustuvilla polttoaineilla. Nämä ovat toistaiseksi hyödyntäneet polttoöljyn lisäksi polttoaineena lähinnä nesteytettyä maakaasua, joka on käytännössä metaania. Myös metanolimoottoreita on lanseerattu kaupalliseen tarjontaan, mutta niiden määrä LNG-moottoreihin verrattuna on tähän asti ollut vähäinen. Metanolimoottoritkin ovat pääsääntöisesti monipolttoainemoottoreita, jotka hyödyntävät toisena polttoaineenaan polttoöljyä. Kaupalliseen käyttöön tarkoitetut ammoniakkimoottorit ovat toistaiseksi vielä pääsääntöisesti kehitysasteella, mutta odotettavissa on, että niistäkin ainakin ensimmäisten sukupolvien mallit tulevat olemaan monipolttoainemoottoreita.

Monipolttoaineratkaisu antavat turvaa varustamoille yksittäisten polttoainetyyppien hintavaihteluiden varalta. Joustoja saataisiin myös, mikäli toiseen polttoaineeseen kohdistuisi alueellisia, lakisäätöisiä käyttörajoituksia. Haittapuolena monipolttoaineratkaisuissa ovat investointi- ja huoltokustannukset. Useat polttoainejärjestelmät aluksessa nostavat kustannuksia sekä suoraan että välillisesti. Erityisesti nesteytetyn kaasun polttoainesäiliö- ja syöttöjärjestelmä nostaa investointikustannuksia merkittävästi. Lisäksi monipolttoainemoottori harvoin toimii optimaalisesti molemmilla polttoaineilla verrattuna tilanteeseen, missä moottori suunniteltaisiin nimenomaan yhdelle polttoaineelle.

# LÄHTEET

Choi, J.K., Kelley, D., Murphy, S. & Thangamani, D. 2017. Economic and environmental perspectives of end-of-life ship management. *Resources, conservation and recycling* 107, 82-91. <https://doi.org/10.1016/j.rescon-rec.2015.12.007>

Ellram, L. 1993. Total cost of ownership: elements and implementation. *International journal of purchasing and materials management* 29(3), 2-11. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.1993.tb00013.x>

Ellram, L. 1995. Total cost of ownership: an analysis approach for purchasing. *International journal of physical distribution & logistics management* 25(8), 4-23. <https://doi.org/10.1108/09600039510099928>

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2023/1805.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413.*

Ferrin, B.G. & Plank, R.E. 2002. Total cost of ownership models: an exploratory study. *Journal of supply chain management* 38(2), 18-29. <https://doi.org/10.1111/j.1745-493X.2002.tb00132.x>

Keane R.G., McNatt, T. & Jeffrey, E. 2017. Reducing total cost of ownership cost: designing robust ship structures. *Naval engineers journal* 129(4), 41-57.

Stavroulakis, P.J. & Papadimitriou, S. 2022. Total cost of ownership in shipping: a framework for sustainability. *Journal of shipping and trade* 7, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s41072-022-00116-7>

# METANOLIN JA BIOKAASUN KESTÄVYYSINDEKSIANALYYSI – REFERAATTI CSUM24- KONFERENSSIPAPERISTA

Taru Tanhuanpää



© Elias Altarriba

Metanoli ja biokaasu ovat mahdollisia tulevaisuuden merenkulun polttoaineratkaisuja. Sekä metanolin että biokaasun tuotanto voi perustua useisiin eri valmistusmenetelmiin, joiden ympäristövaikutukset vaihtelevat. Uusien polttoaineratkaisujen elinkaarenaikaiset kokonaispäästöt ratkaisevat usein vaihtoehdon kokonaiskestävyyden. Tässä artikkelissa referoidaan MERPOL-hankkeessa kirjoitettua konferenssipaperia (Tanhuanpää ym. 2024), joka käsittelee elinkaarianalyysityökalulla saatuja tuloksia. Excel-pohjainen elinkaarianalyysityökalu (LCA-työkalu) kehitettiin MERPOL-hanketta edeltäneessä MEPTek-hankkeessa (Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu -hanke). Alkuperäisellä työkalulla voi analysoida merenkulun fossiilisten polttoaineiden elinkaaren aikaisia päästöjä ja kustannuksia sekä tiettyjen päästövähennystekniikoiden vaikutusta näihin. Päästövähennystekniikat ovat rikkipäästöjä vähentävä rikkipesuri ja typenoksidipäästöjä vähentävä SCR-tekniikka (englannin

kielen sanoista selective catalytic reduction). MERPOL-hankkeessa työkalua päivitettiin uusiutuville polttoaineille. Elinkaarianalyysityökalusta löytyy tarkempaa tietoa tämän julkaisun artikkelista *Metanolin ja biokaasun ympäristökestävyyden analysointityökalu*. Työkalun toiminta on myös esitetty systemaattisesti MEPTEK-hankkeen aikana kirjoitetussa konferenssipaperissa (Altarriba ym. 2023, 364–374).

## Menetelmät

Konferenssipaperissa analysoitiin biometanolin, maakaasupohjaisen eli fossiilisen metanolin sekä nesteytetyn biokaasun (LBG) taloudellista ja ekologista kestävyyttä polttoaineiden elinkaaren aikana. Kestävyyksanalyysin tuloksia vertailtiin myös raskaan polttoöljyn (HFO), vähärikkisen kaasuöljyn (0.1MGO<sup>1</sup>) ja nesteytetyn maakaasun (LNG) kanssa. Tutkimuksessa oletettiin, että alus käyttää metanolin, kaasuöljyn ja raskaan polttoöljyn kanssa SCR-tekniikkaa typpipäästöjen vähentämiseksi. HFO:n käytössä vaaditaan myös rikkipesuri. LBG ja LNG palavat riittävän puhtaasti ilman erillisiä päästövähennystekniikoita. Tutkimuksessa käytettiin LCA-työkalua, joka luo kullekin polttoainevaihtoehdolle niin kutsutun kestävyysindeksin (englanniksi Sustainability Index). Kestävyysindeksi koostuu taloudellisesta indeksistä ja ympäristöindeksistä. Se yhteismitallistaa nämä kaksi kestävän kehityksen ulottuvuutta yhdeksi lukuarvoksi, jolloin eri polttoainevaihtoehtojen kestävyttä voidaan vertailla keskenään.

Taloudellinen indeksi sisältää polttoaineen elinkaaren aikaiset kustannukset, joita ovat esimerkiksi investoinnit moottoreihin, polttoainekustannukset, päästöoikeusmaksut ja mahdollisten päästövähennystekniikoiden investointi- ja käyttökulut. Taloudellinen indeksi lasketaan nettonykyarvomenetelmällä (NPV englannin kielen sanoista Net Present Value).

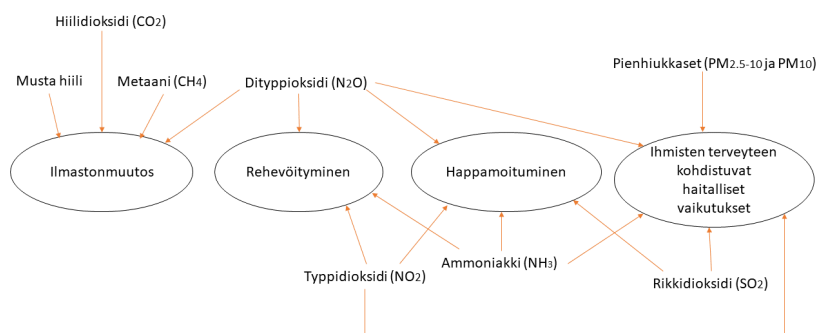
Ympäristöindeksi yhdistää neljä merkittävää ympäristöongelmaa, joita laivaliikenteen päästöt aiheuttavat: ilmaston lämpeneminen, rehevöityminen, happamoituminen ja ihmisten terveyteen kohdistuvat päästöjen haitalliset vaikutukset. Ympäristöindeksiin vaikuttavat polttoaineen tuotannosta ja käytöstä syntyvät päästöt. Kuvasta 1 näkyy kunkin päästölajin vaikutus eri ympäristöongelmiin. Kestävyysindeksimenetelmä, taloudellisen ja ympäristöindeksin laskeminen sekä laskentaa varten käytetyt

---

<sup>1</sup> 0.1MGO on merenkulun kaasuöljy, joka sisältää korkeintaan 0.1 % rikkiä.

oletusarvot, kuten polttoaineiden ja päästöoikeusmaksujen hinnat sekä polttoaineista syntyvät päästömäärät, on kuvattu tarkemmin varsinaisessa konferenssipaperissa (Tanhuanpää ym. 2024) sekä Altarriba ym. (2023, 364–374) paperissa.

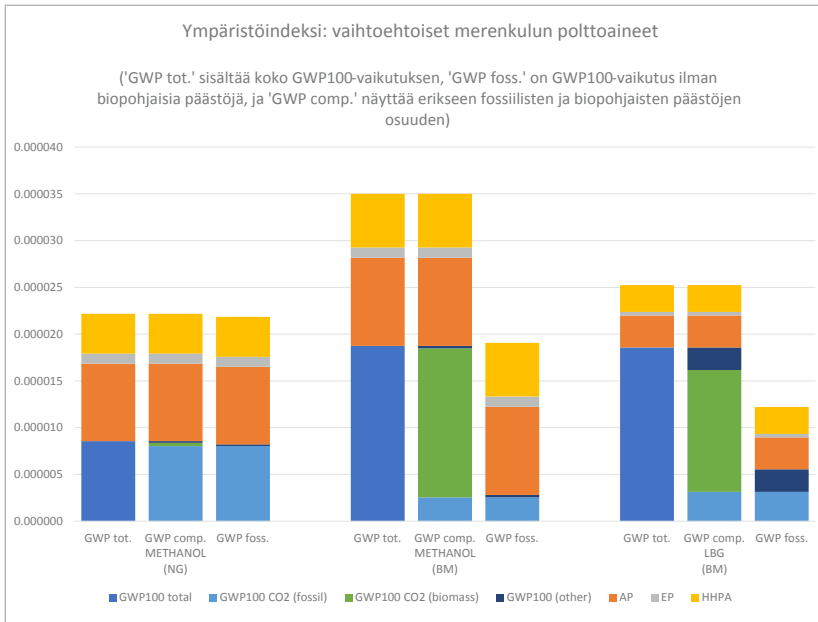
Tutkimuksessa sovelletaan LCA-työkalua hypoteettiseen alukseen, jonka ominaisuudet vastaavat tyypillisiä Itämerellä liikkuvia aluksia. Esimerkki-aluksen ominaisuudet, kuten moottorin ja apukoneiden teho, spesifinen polttoaineen kulutus, merelläolotunnit ja pää- ja apukoneiden kuormitus on esitetty tarkemmin konferenssipaperissa (Appendix, taulukko A7). Näitä oletusarvoja tarvitaan päästöjen ja kustannusten laskemiseen LCA-työkalulla.



*Kuva 1. Ympäristöindeksi muodostuu neljästä ympäristöongelmasta: ilmastomuutos, rehevöityminen, happamoituminen ja ihmisten terveyteen kohdistuvat haitalliset vaikutukset. Kuva havainnollistaa kunkin päästöläjin vaikutusta kuhunkin ympäristöongelmaan.*

## Tulokset

Kuvat 2–5 havainnollistavat LCA-työkalulla saatuja tuloksia. Mitä pienempi kestävyysindeksilukema (kuvilla pystyakselilla), sitä kestävämpi polttoainevaihtoehto on. Ympäristöindeksi sisältää neljä ympäristöongelmaa: ilmaston lämpeneminen 100 vuoden aikajänteellä (kuvilla GWP100, englannin kielen sanoista global warming potential), happamoituminen (AP, sanoista acidification potential), rehevöityminen (EP eli eutrophication potential) ja hiukkaspäästöjen aiheuttamat haitalliset vaikutukset ihmisten terveyteen (HHPA eli human health particulate air).



*Kuva 2. Fossiilisen metanolin, biometanolin ja biokaasun (LBG) ympäristöindeksit. GWP tulee englannin kielen sanoista global warming potential ja kuvaa polttoaineen päästöjen vaikutusta ilmastonmuutokseen. AP tarkoittaa happamoitumista, EP rehevöitymistä ja HHPA päästöjen haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen.*

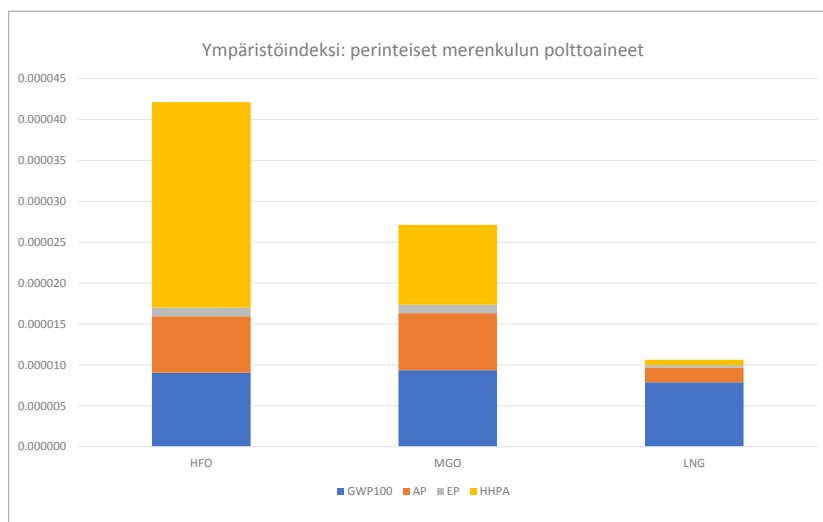
Kuvassa 2 on biometanolille ja LBG:lle kaksi eri ympäristöindeksilukemaa, jotka kuvastavat kahta eri päästöskenaariota. Laivan moottorissa palaessaan biopolttoaineet päästävät ilmakehään suunnilleen saman määrän kasvihuonekaasupäästöjä kuin fossiiliset polttoaineet. Tämä päästömäärä voi kuitenkin parhaimmillaan kompensoitua biopolttoaineen tuotannon aikana niin kutsutun suljetun hiilikierron ansiosta. Koska biomassalla sitoo kasvaessaan hiilidioksidia ilmakehästä, biopolttoaineen käytössä syntyneet päästöt eivät periaatteessa lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Kuvan 2 ”GWP foss” -skenaariossa oletetaan, että suljettu hiilikierto toteutuu biopolttoaineen elinkaaren aikana. Tällöin biopohjaisia kasvihuonekaasupäästöjä (kuvassa vihreä väri) ei synny. Toisaalta jos biomassaviljelmän tieltä hakataan ensin metsää, ilmakehän hiilidioksidipitoisuus kasvaa hakkuista aiheutuvien päästöjen vuoksi. Tällöin polttoaineen tuotannossa ei synny suljettua hiilikiertoa. Tätä tilannetta havainnollistaa ”GWP tot.” -skenaarion ympäristöindeksilukema, jossa biopohjaisten päästöjen osuus kasvaa suureksi (ks. GWP comp. -palkki, jossa kuvattu erikseen biopohjaiset päästöt).

Sekä biometanolin että LBG:n tuotannosta syntyy fossiilisia päästöjä, sillä tutkimuksessa oletetaan, että biomassalla on jalostettu polttoaineeksi

fossiilista energiaa käyttäen (ks. ”GWP comp.”- ja ”GWP foss” -palkeissa vaaleansininen väri). Kuvassa ”GWP100 (other)” kuvastaa polttoaineen käytöstä ja tuotannosta syntyvien dityppioksidi- ja metaanipäästöjen vaikutusta ilmaston lämpenemiseen. LBG:llä vaikutus on merkittävä, sillä polttoaineen palaessa moottorissa syntyy metaanivuotoja, joissa metaania pääsee ilmakehään.

Hiilikierrolla on huomattava vaikutus polttoaineiden ympäristöindeksiin. Kuvasta 2 nähdään, että ”GWP tot.” -skenaariossa maakaasupohjainen eli fossiilinen metanoli on selvästi paras vaihtoehto ympäristöindeksiltään. Sen sijaan suljetussa hiilikierrossa eli biopohjaisten päästöjen eliminoituessa LBG:stä tulee ympäristön kannalta paras vaihtoehto. Fossiilinen metanoli pärjää huonoinen, koska tässä skenaariossa se aiheuttaa eniten kasvihuonekaasupäästöjä. Metaanivuotojen takia LBG:n käyttö lämmittää ilmastoa jonkin verran enemmän kuin biometanolin käyttö. Kokonaisuudessaan sen ympäristöindeksi on kuitenkin pienempi kuin biometanolin, koska se aiheuttaa vähemmän happamoitumista, rehevöitymistä ja ihmisten terveydelle haitallisia päästöjä.

Kuva 3 esittää perinteisten merenkulun polttoaineiden ympäristöindeksejä. Nesteytetyn maakaasun ympäristöindeksi on selvästi pienin, koska sen käyttö ei aiheuta juurikaan typen tai rikin oksideja. Sen sijaan erot ilmastovaikutuksessa ovat perinteisten polttoaineiden välillä pienet (kuvassa sininen väri).

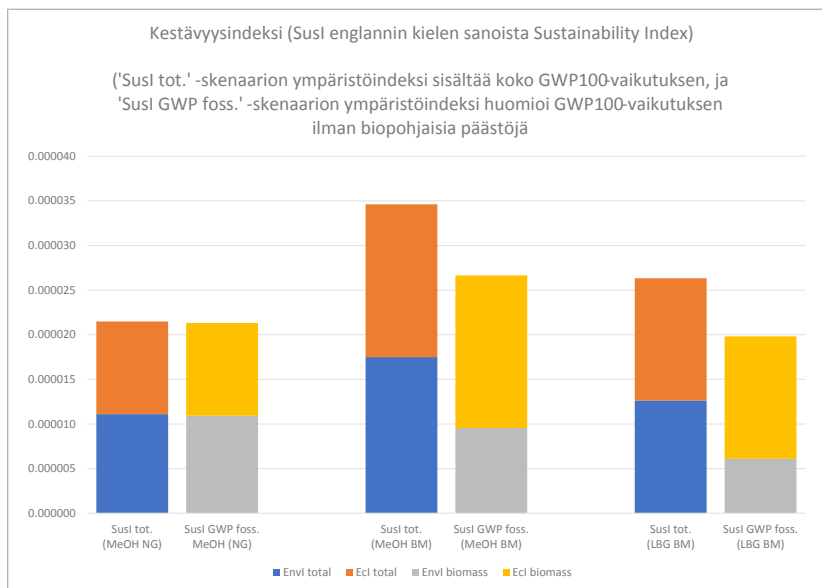


Kuva 3. Raskaan polttoöljyn (HFO), merenkulun kaasuöljyn (MGO) ja nesteytetyn maakaasun (LNG) ympäristöindeksit.

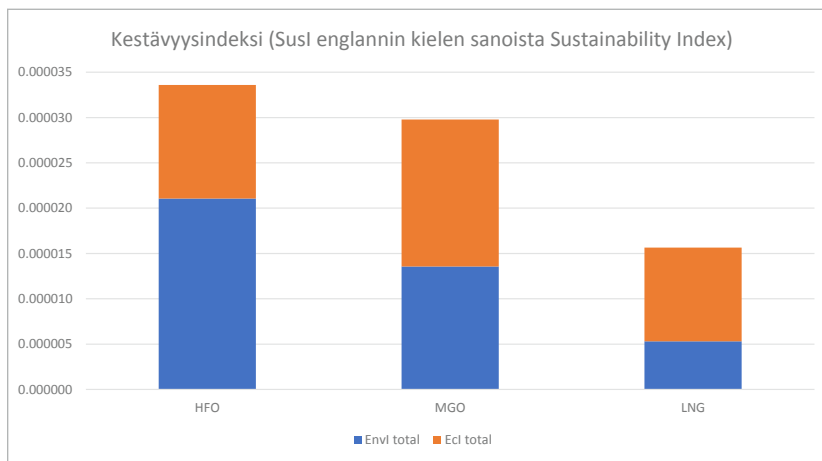
Kenties yllättävin tulos on se, että kaikista kuudesta polttoainevaihtoehdosta nesteytetyllä maakaasulla on pienin ympäristöindeksi (vrt. kuvat 2 & 3). Suljetun hiilikierron skenaariossa ("GWP foss.") nesteytetyn maakaasun ja nesteytetyn biokaasun välinen ero ympäristöindeksissä on kuitenkin hyvin pieni. Ero johtuu siitä, että LNG aiheuttaa LBG:tä vähemmän happamoittavia ja ihmisterveydelle haitallisia päästöjä. Sen sijaan LBG:n ilmastovaikutus on hitusen pienempi tässä skenaariossa. On huomattava, että LBG:n ilmastovaikutusta voitaisiin edelleen pienentää, jos polttoaineen jalostamisessa käytettäisiin uusiutuvaa energiaa fossiilisen sijaan. Tällöin LBG:n ympäristöindeksi olisi pienempi kuin nesteytetyn maakaasun.

Toisaalta LBG:n ympäristöindeksi on hiukan pienempi kuin MGO:n jopa ilman suljettua hiilikiertoa, koska se aiheuttaa vähemmän happamoittavia ja ihmisten terveydelle haitallisia päästöjä. Sen sijaan LBG:n ilmastovaikutus on huomattavasti suurempi kuin MGO:lla, jos hiilikierto ei ole suljettu. Biometanoli päihittää MGO:n ympäristöindeksillään vain suljetun hiilikierron skenaariossa.

Kuvat 4 ja 5 esittävät polttoaineiden kokonaiskestävyysindeksejä, joissa on ympäristövaikutusten lisäksi mukana elinkaaren aikaiset kustannukset. Nesteytetyn maakaasun kokonaiskestävyysindeksi on selvästi pienin verrattuna muihin polttoainevaihtoehtoihin. Vaikka ero LNG:n ja nesteytetyn biokaasun ympäristöindekseissä (kuvissa lyhenteellä Envl englannin kielen sanoista Environmental Index) suljetussa hiilikierrossa on pieni, ero kokonaiskestävyydessä on suuri. Tämä johtuu siitä, että LNG:n taloudellinen indeksi (kuvissa lyhenteellä Ecl englannin kielen sanoista Economic Index) on huomattavasti pienempi kuin LBG:n, jonka markkinahinta on toistaiseksi korkea. Ero kestävyysindekseissä LNG:n ja HFO:n välillä johtuu ympäristöindeksistä ja LNG:n ja MGO:n välillä sekä taloudellisesta että ympäristöindeksistä. Fossiilinen metanoli on puolestaan kokonaiskestävyydeltään HFO:ta ja MGO:ta parempi, sillä sen hiukan isompi taloudellinen indeksi kompensoituu pienemmällä ympäristöindeksillä.



Kuva 4. Fossiilisen metanolin, biometanolin ja biokaasun (LBG) kokonais-kestävyysindeksi, joka koostuu ympäristöindeksistä (Envl) ja taloudellisesta indeksistä (Ecl).



Kuva 5. Raskaan polttoöljyn (HFO), merenkulun kaasuöljyn (MGO) ja nesteytetyn maakaasun (LNG) kestävyysindeksit.

## Pohdinta ja johtopäätökset

Tutkimustulokset osoittavat elinkaarianalyysin merkityksen vaihtoehtoisia polttoaineita vertailtaessa. Jos fossiilisten polttoaineiden korvaajat valitaan vain käytönaikaisten päästöjen perusteella, ilmakehän kasvihuonekaasupitoisuus voi jopa lisääntyä. Tämä on todellinen riski ainakin biopolttoaineiden kanssa, jos niiden käytönaikaiset päästöt eivät kom-

pensoidu tuotannon aikana suljetulla hiilikierrolla. Toisaalta ilmastonmuutos saattaa jättää varjoonsa muita merkittäviä ympäristöongelmia. Osa vaihtoehtoisista polttoaineista aiheuttaa enemmän happamoittavia ja rehevöittäviä päästöjä kuin fossiiliset polttoaineet. Tämä ei tietenkään ole syy olla siirtymättä pois fossiilisista polttoaineista, koska ilmastonmuutoksen hillitseminen on välttämätöntä. Vaihtoehtoisia energianlähteitä valittaessa on kuitenkin syytä huomioida myös vaikutukset muihin ympäristöongelmiin, jotteivat muut ympäristöongelmat samalla lisäänty.

Yritykselle on olennaista investoinnin koko elinkaaren aikaiset kustannukset, joita tässä tutkimuksessa laskettiin taloudellisen indeksin avulla. Vaihtoehtoisien ja fossiilisten polttoaineiden välistä hintaeroa on kurottava, jotta vaihtoehtoisien polttoaineiden käyttämisestä tulisi laivayhtiöille taloudellisesti kannattavaa. Keskeinen pullonkaula on vaihtoehtoisien polttoaineiden tarjonta, jonka pitäisi lisääntyä huomattavasti saatavuuden lisäämiseksi ja siten hintaeron kuromiseksi. Hintaeroa voitaisiin pienentää jonkin verran myös merenkulun fossiilisten polttoaineiden verotuksella. On huomattava, että LCA-työkalun taloudellisessa indeksissä oli mukana päästöoikeusmaksut, joita maksetaan EU:n meriliikenteessä polttoaineen käytöstä syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen mukaan. Tästä huolimatta perinteisten polttoaineiden taloudellinen indeksi oli vaihtoehtoisien indeksiiä parempi. Tutkimuksessa oletettiin päästöoikeuden hinnaksi 100 euroa. Jos päästöoikeuden hinta nousee tulevaisuudessa, fossiilisten polttoaineiden taloudellinen indeksi huononee.

Kestävyysindeksin tulokset riippuvatkin voimakkaasti lähtöoletuksista. Taloudelliseen indeksiin vaikuttavat päästöoikeusmaksujen lisäksi esimerkiksi oletukset polttoaineiden hinnoista, joihin liittyy paljon epävarmuutta etenkin vaihtoehtoisissa polttoaineissa. Ympäristöindeksiin vaikuttaa muun muassa se, mitä ympäristöongelmia indeksiin valitaan. Myös siihen, kuinka paljon mikäkin päästölaji vaikuttaa eri ympäristöongelmiin, liittyy jonkin verran epävarmuutta (ks. kuva 1 eri päästölajien vaikutuksesta tässä tutkimuksessa mukana olleisiin ympäristöongelmiin). Jatkotutkimuksissa kestävyysindeksianalyyysiä voisi soveltaa muihinkin merenkulun vaihtoehtoisiiin polttoaineisiin, kuten ammoniakkiin. Myös herkkyyksianalyyisit olisivat tarpeen, eli tulosten herkkyyttä tutkimuksessa tehdyille eri oletuksille tulisi tarkastella.

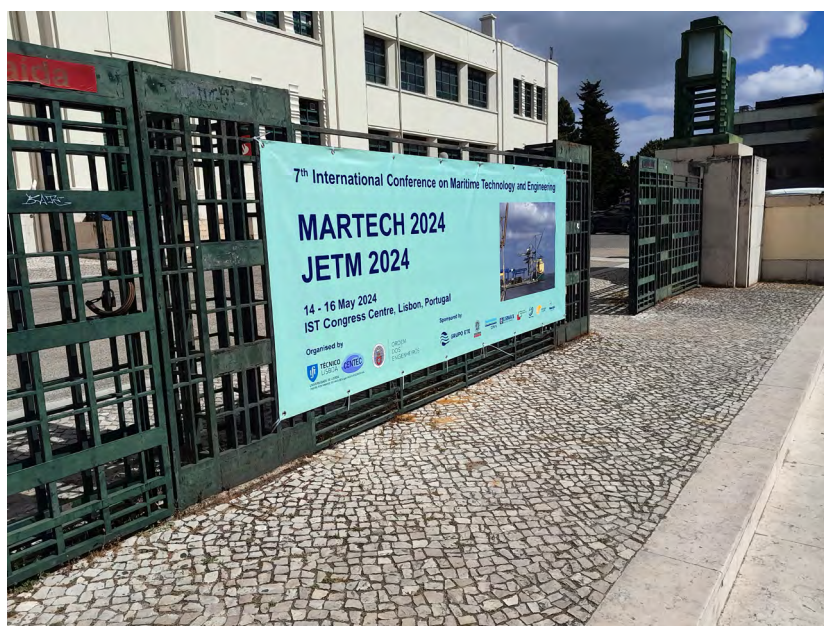
## LÄHTEET

*Altarriba, E., Rahiala, S., Tanhuanpää, T. & Piispa, M. 2024. Developing sustainable shipping and maritime transport: Multi-criteria analysis between emission abatement methods. Proceedings of the institution of mechanical engineers part M: journal of engineering for the maritime environment 2, 364–374. Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/14750902231199132>.*

*Tanhuanpää, T., Altarriba, E. & Rahiala, S. 2024. Transition towards fossil-free energy sources in the shipping sector: a sustainability index analysis of methanol and liquefied biogas. 7th conference on sustainable mobility (CSuM 2024, 4.–6.9.2024). Tulossa julkaistavaksi: Lecture notes in intelligent transportation and infrastructure (Springer).*

# RIKKIPÄÄSTÖJEN YMPÄRISTÖ- INDEKSIMENETELMÄANALYYSI – REFERAATTI MARTECH24-KONFE- RENSSIPAPERISTA

Taru Tanhuanpää



© Elias Altarriba

Rikkioksidipäästöt ovat olleet pitkään meriliikenteelle tyypillinen päästömuoto. Polttoaineiden enimmäisrikkipitoisuussäädökset ovat vähentäneet näitä päästöjä huomattavasti. Varustamoilla on sääntöjen mukaan oikeus vähärikkisen polttoaineen käytön sijaan asennuttaa aluksiinsa rikkipesurit, jolloin rikkipitoisen, mutta hankintahinnaltaan edullisemmän polttoaineen käyttö on sallittua. Tässä artikkelissa referoidaan MERPOL-hankkeessa kirjoitettua konferenssipaperia (Altarriba ym. 2024, 3–9), jossa analysoidaan tutkimuksen kohteena olevista rikkipesureista muodostuvaa lyhytaikaista mutta voimakasta rikkipöllähdyistä pesureiden sammuttamisen jälkeen ja tämän pöllähdyksen haittavaikutuksia ympäristöindeksimenetelmällä. Tutkimus painottaa rikkipäästöjen haittoja ihmisten terveydelle sekä happamoitumista pahentavia vaikutuksia.

Meriliikenne aiheuttaa noin 13 prosenttia ihmistoiminnan aiheuttamista globaaleista rikkioksidipäästöistä (Aakko-Saksa ym. 2023, 3). Toimialaa koskevat rikkipäästörajoitukset ovat tiukentuneet vuosikymmenten saatossa: vuoteen 2011 asti laivat saivat käyttää peräti 4,5 prosenttia rikkiä sisältävää polttoainetta ja vuodesta 2012 alkaen 3,5 prosenttia rikkiä sisältävää polttoainetta (IMO 2008). Vuonna 2020 globaali rikkiraja tiukeni merkittävästi 0,5 prosenttiin (IMO 2016). Itämeri on sen sijaan ollut rikkioksidipäästöjen rajoitusalue (englanniksi Sulfur Emission Control Area eli SECA) jo vuodesta 2015 alkaen. SECA-alueilla laivojen käyttämä polttoaine saa sisältää enintään 0,1 prosenttia rikkiä, jollei aluksella ole käytössä rikkipesureita eli skrubbereita. Myös Välimerestä on tulossa SECA-alue vuonna 2025 (IMO 2022).

Jos aluksella on käytössä rikkipesurit, moottoreissa voidaan käyttää polttoaineena rikkipitoista raskasta polttoöljyä, joka on vähärikkistä vaihtoehtoa edullisempaa. Skrubberiteknologioita on kahdentyyppisiä: avoimen kierron pesurit pesevät rikin pois pakokaasuista merivedellä, joka päästetään takaisin mereen pesuprosessin jälkeen. Suljetun kierron pesureissa pesuprosessi perustuu suljettuun natriumhydroksidikiertoon (NaOH), jolloin pesuvettä päästetään huomattavasti vähemmän takaisin veteen ja tämäkin vasta puhdistuksen jälkeen. Lisäksi aluksella voi olla käytössä hybridimalli, jossa käyttäjä voi valita suljetun ja avoimen kierron operoinnin väliltä. (Altarriba ym. 2024, 3–9.)

Veteen päästettävät pesuvedet sisältävät PAH-yhdisteitä ja raskasmetalleja, joiden vaikutuksista vesieliöstöön tiedetään vasta vähän. Tämän vuoksi jotkin maat, kuten Saksa, ovat kieltäneet avoimen kierron pesureiden käytön sisäisillä kulkuvesillä. Tuolloin avoimen kierron pesurit on sammutettava ennen näille alueille saapumista. Samalla aluksen on siirryttävä käyttämään vähärikkistä polttoainetta täyttääkseen rikkipäästörajoitukset. (Altarriba ym. 2024, 3–9.)

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun henkilöstö mittasi päästöjä laivalla, joka sammutti rikkipesurin ennen rajoitusalueelle saapumista. Mitauksissa havaittiin lyhytaikainen (n. 10 min), mutta suhteellisen voimakas rikkipäästöpollähdyks. Koska rikkipesuri sammutetaan juuri ennen satamaan saapumista, ilmiö tapahtuu asutuksen läheisyydessä. Altarriba ym. (2024, 3–9) tutkimuksessa analysoidaan rikkipollähdyksen haittavaikutuksia ympäristöindeksimenetelmällä.

## Menetelmät

Ympäristöindeksimenetelmä on osa kestävyysindeksimenetelmää (engl. Sustainability Index Method), jonka ovat kehittäneet laivaliikenteelle Iannaccone ym. (2020). Kestävyysindeksi koostuu ympäristöindeksistä ja taloudellisesta indeksistä koostaen nämä kaksi kestävä kehityksen osa-alueita yhdeksi lukuarvoksi. MEPTK-hankkeessa<sup>1</sup> kehitetyllä LCA-työkalulla voi laskea laivaliikenteen eri polttoaineille kestävyysindeksin. LCA-työkalu ja kestävyysindeksimenetelmä on esitetty tarkemmin artikkelissa *Metanolin ja biokaasun kestävyysindeksianalyysi – Referaatti CSuM24-konferenssipaperista*.

Altarriba ym. (2024, 3–9) tutkimuksessa käytettiin vain ympäristöindeksiä, sillä tarkastelu haluttiin rajata nimenomaan ympäristövaikutuksiin. Ympäristöindeksi yhdistää yhdeksi lukuarvoksi neljä merkittävää ympäristöongelmaa, joita laivaliikenteen päästöt aiheuttavat: ilmaston lämpeneminen, rehevöityminen, happamoituminen ja ihmisten terveyteen kohdistuvat päästöjen haitalliset vaikutukset. Näitä kutsutaan ympäristöpotentiaaleiksi. Ympäristöindeksiin vaikuttavat polttoaineen tuotannosta sekä käytöstä syntyvät päästöt. Artikkelin *Metanolin ja biokaasun kestävyysindeksianalyysi – Referaatti CSuM24-konferenssipaperista* kuvassa 1 on esitetty kunkin päästölajin vaikutus kuhunkin neljään ympäristöpotentiaaliin.

Ympäristöindeksissä kullekin potentiaalille valitaan oma painokertoimensa. Painokerroin kuvaa kunkin ympäristöpotentiaalin suhteellista vaikutusta ympäristöindeksiin. Painokerrointen summa on aina yksi. Tässä konferenssipaperissa tarkasteltiin kahta eri skenaariota, joissa painokertoimia muutettiin. Ympäristöindeksit on laskettu kaavan 1 (skenaario 1) ja kaavan 2 (skenaario 2) mukaan.

$$EnvI = 0.3 * GWP + 0.3 * AP + 0.2 * EP + 0.2 * HHPA \quad (1)$$

$$EnvI = 0.1 * GWP + 0.3 * AP + 0.1 * EP + 0.5 * HHPA \quad (2),$$

joissa GWP on ilmaston lämpenemispotentiaali (global warming potential), AP happamoitumispotentiaali (acidification potential), EP rehevöityminen (eutrophication potential) ja HHPA-potentiaali kuvaa päästöjen haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen (human health particulate air).

<sup>1</sup> Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu -hanke toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulussa (Xamk) 1.5.2020–31.12.2022.

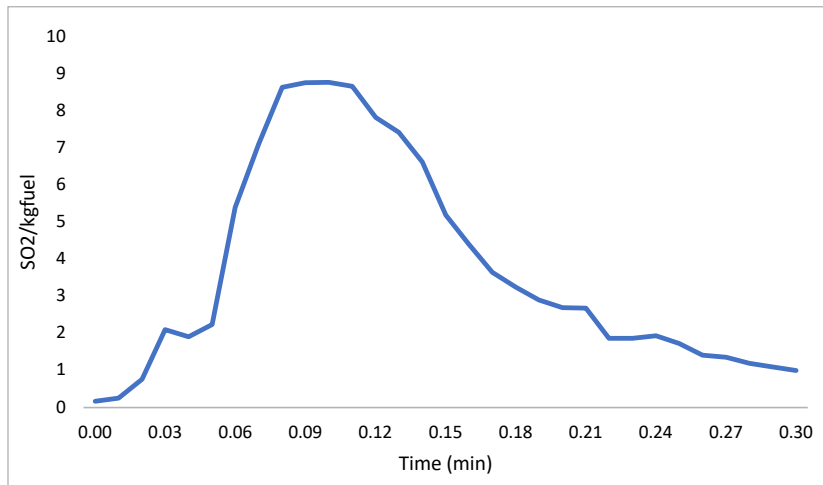
Desimaaliluvut kuvaavat potentiaalien painokertoimia. Skenaariossa 1 suurimman painoarvon ympäristöindeksissä saavat siis ilmaston lämpeneminen ja happamoituminen. Kertoimet ovat peräisin lannaccone ym. (2020) tutkimuksesta. Skenaariossa 2 suurimman painoarvon saavat happamoituminen ja HHPA-potentiaali, jonka painokerroin kasvaa 0,2:sta 0,5:een. Tällöin ilmaston lämpeneminen ja rehevöityminen saavat pienemmän painoarvon kuin analyysissä 1. Rikkipäästöt pahentavat happamoitumista ja ovat haitallisia ihmisten terveydelle. Siksi nämä kaksi kategoriasta saavat suurimman painoarvon skenaariossa 2, joka korostaa rikkipölyhdyksen haittavaikutuksia. Ilmiö tapahtuu asutuksen läheisyydessä, jonka vuoksi HHPA-potentiaalille annettiin suurin painoarvo. Toisaalta Itämeri on matalana vesistönä altis happamoitumiselle.

Päästömittaukset suoritettiin avoimen kierron rikkipesureilla varustetulla ROPAX-aluksella, joka Saksan rajoitusalueelle saapuessaan sammuttaa pesurit ja vaihtaa polttoaineen vähärikkiseen kevyeen polttoöljyyn. Tämä johtuu siitä, että Saksan sisäisillä kulkuvesillä avoimien rikkipesurien käyttö on kielletty. Mittaukset suoritettiin sekä laivan liikennöidessä avovedessä että sen lähestyessä satamaa. Avovesiliikennöinnin aikana aluksessa käytettiin raskasta polttoöljyä (RMG380) avoimen kierron pesureiden kanssa. Tänä aikana pesurien toiminta oli tehokasta ja mittausten perusteella rikkipäästöt täyttivät vaaditut rajat selkeästi. Polttoaineen vaihto (0.1MGO) aloitettiin aluksella noin 90 minuuttia ennen rajoitusalueelle saapumista, jotta polttoaine on varmasti vaihtunut ennen pesurien sammuttamista. Alkuperäisessä konferenssipaperissa ja siten myös tässä referaatissa käsitellään vain päästöjä, jotka syntyivät aluksen lähestyessä satamaa. Mittausprosessi on kuvattu tarkemmin konferenssipaperissa Altarriba ym. (2024, 3–9) ja Altarriba ym. (465–471).

## Tulokset

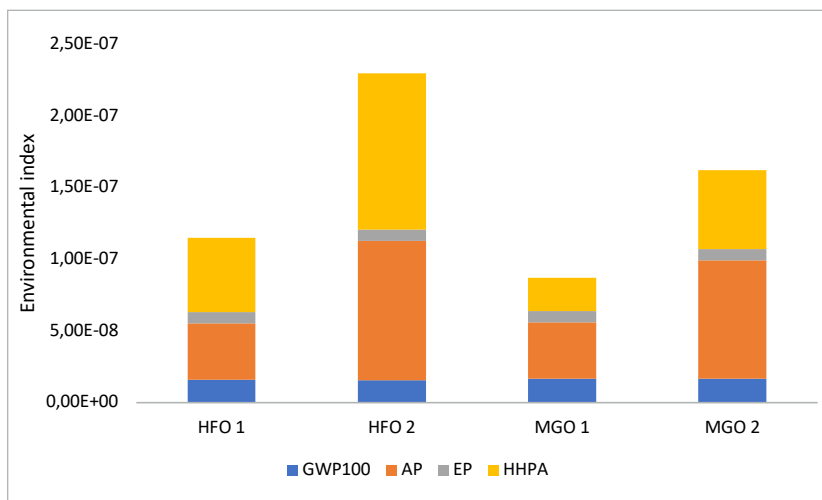
Kuva 1 havainnollistaa päästömittauksen tuloksia. Rikkipesuri sammutetaan ajassa 0:00, ja aluksella käytetään vähärikkistä, Itämeren rikkirajat täyttävää kaasuöljyä eli MGO:ta koko mittauksen ajan. Rikkipesurin sammussa jäljellä oleva rikkipitoinen aine höyrystyy ja kuumenee pakokaasujen vaikutuksesta aiheuttaen lyhytkestoisia mutta voimakkaasti rikkipölyhdyksen, joka näkyy kuvassa 1. Altarriba ym. (2024) konferenssipaperissa verrataan rikkipölyhdyksen ajankohtaa laivan pääkoneiden tehoon eri ajanhetkinä ja todetaan, etteivät nämä korreloi keskenään. Tämä vahvistaa päätelmää siitä, että rikkipölyhdys johtuu nimenomaan pesuriin jääneestä rikkipitoisesta aineksestä eikä esimerkiksi diesel-

moottorin operoinnista. Pääkoneiden tehot mittausmatkan aikana on esitetty yksityiskohtaisesti alkuperäisessä konferenssipaperissa.

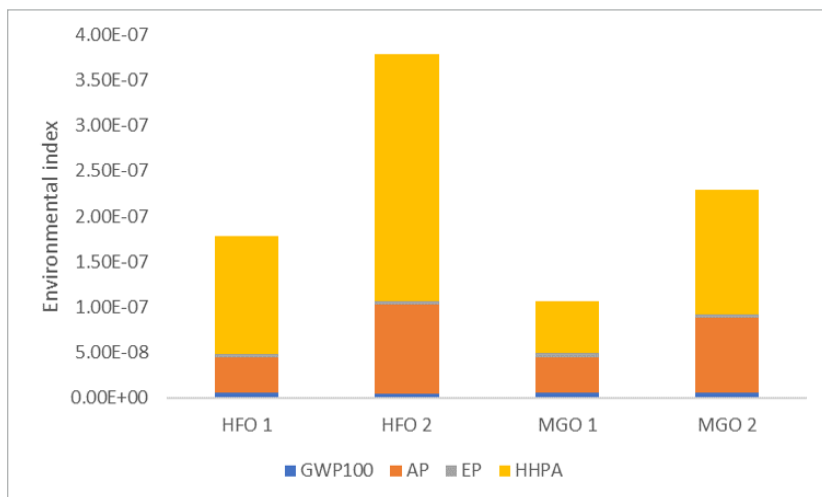


Kuva 1. Pakokaasujen rikkipitoisuuden hetkellinen kasvu

Kuvat 2 ja 3 esittävät ympäristöindeksianalyysin tuloksia. Indeksit on laskettu neljälle eri tapaukselle, joilla simuloidaan rikkipesureiden käytön ja eri polttoaineiden ympäristövaikutuksia. Kuva 2 esittää skenaarion 1 tuloksia ja kuva 3 tuloksia skenaariossa 2, jossa rikkipäästöjen haittavaikutuksilla on suurempi painoarvo. Kuvissa näkyy myös kunkin ympäristöpotentiaalnin vaikutus kokonaisympäristöindeksiin. Kuvissa "HFO 1" simuloi tilannetta, jossa aluksella käytettäisiin korkearikkistä polttoöljyä (heavy fuel oil) koko matkan ajan avoimen kierron rikkipesurien kanssa. Koska avoimen kierron pesurien käyttö on kielletty Saksan sisäisillä kulkuvesillä, "HFO 1" on hypoteettinen tilanne, jossa pesurit ovat käytössä ja aluksella operoidaan rikkipitoisuudeltaan 2,5-prosenttisella raskaalla polttoöljyllä. "HFO 2" -vaihtoehdossa puolestaan käytetään ilman rikkipesureita HFO:ta, jonka rikkipitoisuus on 0,5 %. Tämäkin vaihtoehto on Itämeren alueella kielletty (eli kyseessä on hypoteettinen skenario), mutta globaalit rikkirajat täyttyvät. Äkillistä rikkipölyhdystä ei oleteta syntyvän kummassakaan tapauksessa (toisessa pesurit ovat jatkuvassa käytössä, toisessa pesureita ei ole ollenkaan).



Kuva 2. Eri polttoaine- ja päästövähennystekniikkayhdistelmien ympäristöindeksit skenaariossa 1.



Kuva 3. Eri polttoaine- ja päästövähennystekniikkayhdistelmien ympäristöindeksit skenaariossa 2.

”MGO 1” on realistinen tilanne Itämerellä. Alus käyttää koko ajan enintään 0,1 % rikkiä sisältävää kaasuöljyä (marine gas oil) kuten kuvan 1 mittauksenkin aikana aluksella. Käytössä ei kuitenkaan ole rikkipesuria, jolloin kuvan 1 mukaista rikkipölyhdystä ei synny. ”MGO 2” simuloi pesurin sammutuksesta aiheutuvaa rikkidioksidipäästöjen äkillistä nousua: Aikavälin 0:00–0:30 (ks. kuva 1) keskimääräinen päästömäärä vastaa tilannetta, jossa polttoaineen rikkipitoisuus olisi laskennallisesti 3,71 %. Tämä on huomattavasti korkeampi kuin pitoisuus, joka saavutetaan ”HFO 1” -tilanteessa eli korkearikkisen polttoaineen kanssa pesureilla.

Mitä pienempi ympäristöindeksi polttoainevaihtoehdolla on, sitä parempi se on ympäristön kannalta. Kuvista 2 ja 3 nähdään, että MGO 1-vaihtoehto on ympäristön kannalta paras molemmissa skenaarioissa. Tämä puoltaa nykyisiä Itämerellä käytössä olevia rikkirajoituksia. Seuraavaksi paras vaihtoehto on ”HFO 1”, jossa rikkipesurit erottautuvat edukseen. Huonoin vaihtoehto molemmissa skenaarioissa on ”HFO 2”, joka on hyvinkin realistinen tilanne valtamerillä ja muilla vesialueilla, joissa SECA-alueita koskevat tiukemmat rikkirajoitukset eivät ole käytössä.

On kenties yllättävää, että vaihtoehto MGO 2 on huonompi kuin HFO 1. Toisin sanoen tämän analyysin mukaan olisi lähipäästöjen näkökulmasta kestävämpää ajaa koko matka rikkipesurien kanssa korkearikkisellä polttoaineella kuin sammuttaa pesurit, jolloin syntyy rikkipölylähdys. On kuitenkin syytä huomata, ettei tutkimuksessa huomioitu pesureista laskeutuneiden pesuvesien haitallista vaikutusta vesieliöstöön, mikä huonontaisi (avoimen kierron) pesurien käytön ympäristöindeksiä ainakin jonkin verran. Toisaalta tarkasteltava satama-alue sijoittuu mereen virtaavaan jokeen, jolloin veteen lasketut haitalliset yhdisteet virtaavat joka tapauksessa suhteellisen nopeasti siihen samaan merialueeseen, jonne pesuvesien laskeminen on sallittua.

Tutkimuksessa analysoitujen skenaarioiden tulokset ovat yhtäläisiä siinä, että vaihtoehtojen järjestys ympäristökestävyyden suhteen pysyy muuttumattomana. Skenaariossa 2 korostuu kuitenkin happamoitumispotentialin, ja etenkin HHPA-potentiaalın, vaikutus ympäristöindeksiin, kun rehevöitymisen ja ilmastomuutoksen painoarvo on pienempi. Ympäristöindeksit on esitetty lukuina taulukossa alkuperäisessä konferenssipaperissa.

## Pohdinta ja yhteenveto

Avoimen kierron rikkipesurien pesuvesien mahdolliset haittavaikutukset vesistöissä ovat olleet esillä jo useamman vuoden ajan. Avoimen kierron pesurien käyttö onkin jo kielletty monissa satamissa tai sisäisillä kulkuväylillä, ja myös Suomessa ja Ruotsissa suunnitellaan vastaavia rajoituksia. Huoli pesuvesien haitoista on perusteltu, mutta samalla keskustelussa on jäänyt varjoon pesurien sammutuksesta aiheutuva rikkipölylähdys. Altariba ym. (2024, 3–9) konferenssipaperin tulokset osoittavat, että tähänkin ilmiöön olisi syytä kiinnittää huomiota, kun suunnitellaan alueellisia kieltoja avoimen kierron rikkipesurien käytölle. Toisaalta on syytä huomioida, että rikkipölylähdys olisi varsin helposti estettävissä teknisillä rat-

kaisuin: mikäli kuumat pakokaasut ohjattaisiin ohituskanavaan pesurin sammuttamisen yhteydessä, tämä ilmiö todennäköisesti jäisi syntymättä.

Konferenssipaperin tuloksiin vaikuttavat useat oletukset, joita on tehtävä ympäristöindeksin muodostamiseksi. Näitä ovat muun muassa ympäristöpotentiaalien painokertoimet ja eri päästölajien vaikutus ympäristöpotentiaaleihin. Tutkimuksessa ei huomioitu esimerkiksi avoimen kierron pesurien pesuvesien vaikutusta vesiliöistöön. Jatkotutkimuksissa tämä ilmiö voitaisiin lisätä ympäristöindeksiin, kun aiheesta julkaistaan lisää tutkimustietoa.

## 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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.101055>.

Altarriba, E., Rahiala, S. & Tanhuanpää, T. 2023. Open-loop scrubbers and restricted waterways: a case study investigation of Travemünde port and increased sulphur emissions immediately after the scrubbers are turned off. *International journal on marine navigation and safety of sea transportation* 2, 465–471. Saatavissa: <https://doi.org/10.12716/1001.17.02.24>.

Altarriba, E., Tanhuanpää, T. & Rahiala, S. 2024. An analysis of the momentary sulfur emission peak of open-loop scrubbers applying the environmental index. *Advances in maritime technology and engineering*, volume 2, 3–10. Saatavissa: <https://doi.org/10.1201/9781003508779-1>.

Iannaccone, T., Landucci, G., Tugnoli, A., Salzano, E. & Cozzani, V. 2020. Sustainability of cruise ship fuel systems: comparison among LNG and diesel technologies. *Journal of cleaner production* 260, 121069. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121069>.

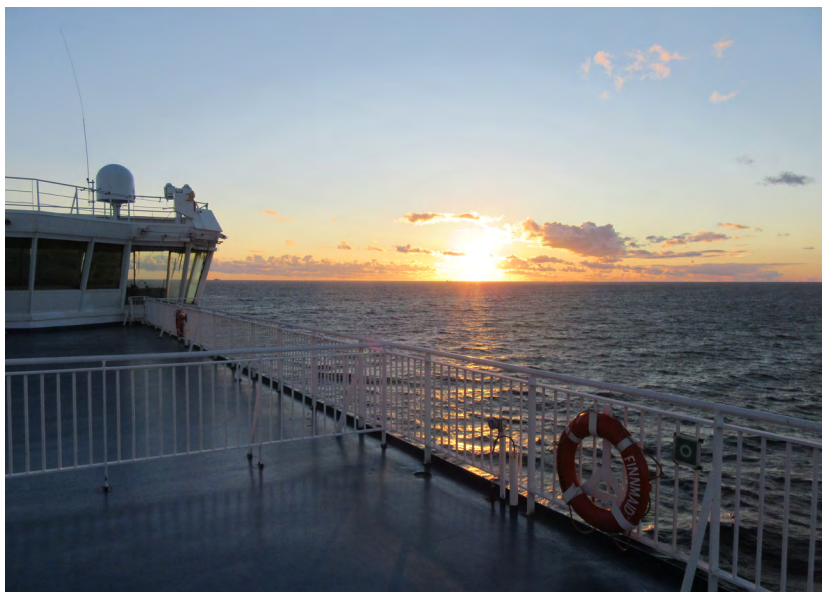
*International maritime organization [IMO]*. 2008. Report of the marine environment protection committee on its fifty-eight session. IMO resolution MEPC. 58/23 (adopted on 16 October 2008).

*International maritime organization [IMO]*. 2016. Effective date of implementation of the fuel oil standard in regulation 14.1.3 of MARPOL Annex VI. IMO resolution MEPC. 280(70) (adopted on 28 October 2016).

*International maritime organization [IMO]*. 2022. Amendments to the annex of the protocol of 1997 to amend the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973, as modified by the protocol of 1978 relating thereto (Mediterranean Sea Emission Control Area for Sulphur Oxides and Particulate Matter). IMO resolution MEPC. 361(79) (adopted on 16 December 2022).

# POHDINTAA KÄYTTÖVOIMAVAIHTOEHTOJEN TULEVAISUUDENNÄKYMISTÄ

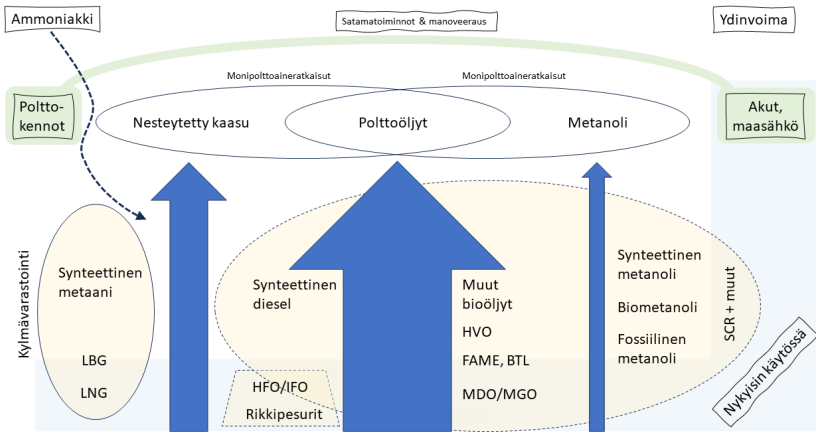
Elias Altarriba



© Elias Altarriba

Meriliikenteessä fossiilisten polttoöljyjen käyttö energianlähteenä on ollut vallitseva trendi viimeistään sen jälkeen, kun höyrykäyttöisistä aluksista siirryttiin moottorialuksiin toisen maailmansodan jälkeen. Kauppamerenkulussa pääasialliseksi polttoaineeksi valikoitui raskas polttoöljy sen edullisen hankintahinnan takia. Raskasöljyn käytön vaatimille esikäsittelyjärjestelmille kauppalaivoissa oli myös riittävästi tilaa, eikä lisäpainokaan ollut ongelma. Sittemmin ympäristömääräysten kiristymisen seurauksena myös tislepolttoaineet (Marine Diesel Oil eli MDO / Marine Gas Oil eli MGO) ovat yleistyneet kauppamerenkulussa. Myös LNG-alukset ovat 2010-luvulta alkaen asteittain yleistyneet. Suurin osa LNG-aluksista on varustettu monipolttoainemoottoreilla, jolloin alusta on mahdollista operoida LNG:n lisäksi myös perinteisillä polttoöljyillä. Monesti raskaan polttoöljyn esikäsittelyjärjestelmiä ei kuitenkaan ole kustannussyistä asennettu, joten käytännössä toisena polttoaineena on silloin MGO-tuoteperheen joku polttoainetyyppi (esim. DMA tai DMB) rikkipäästörajoituksista johtuen. Myös raskaista tai keskiraskaista polttoöl-

yyistä osa polttoaineiden valmistajista on jalostanut vähärikkisiä tuotteita, jolloin niiden käyttö on mahdollista ilman rikkipesureita. Hankintahinta on selkeästi korkearikkisiä tuotteita korkeampi, mutta usein silti edullisempi verrattuna tislepolttoaineisiin. Rikkipesureilla on luvallista operoida myös korkearikkisillä polttoöljyillä. Kuvassa 1 näkyy kooste polttoaineratkaisujen nykytilasta ja mahdollisista tulevista trendeistä.



Kuva 1. Nykyiset polttoainevaihtoehdot ja mahdolliset tulevat kehityssuunnat

Kuvassa 1 sinisellä pohjalla näkyy nykyisin käytössä olevat ratkaisut. Laajassa mittakaavassa näitä ovat LNG, HFO/IFO, MDO/MGO sekä mahdollisesti tarvittavat jälkikäsittelyjärjestelmät, kuten rikkipesurit tai SCR-katalyysaattorit. Myös muita jälkikäsittelyjärjestelmiä on olemassa. Maasähkövalmius on yhä useammassa aluksessa, ja monet suuremmat satamat mahdollistavat jo maasähkön syöttämisen alukseen. Osa varustamoista on investoinut hybridialuksiin, jotka on varustettu akustoilla. Niiden avulla alus voi olla jonkin aikaa satamassa ilman, että apukoneet ovat käynnissä tai että alus on kytketty maasähköverkkoon. Periaatteessa sama voisi olla toteutettavissa myös polttokennoilla, mutta vaadittavan teholuokan polttokennojen kalliiden investointikustannusten takia niiden yleistymistä ei ole vielä tapahtunut. Sekä akut, polttokennot että maasähkö ovat säädöksen tarkoittamia nollapäästäteknologioita, joita matkustaja- ja konttialusten on käytettävä TEN-T-verkon satamissa yli kahden tunnin satamakäyntien aikana vuodesta 2030 alkaen (EU 2023/1804; EU 2023/1805).

Polttoöljymoottorit ovat eniten käytetty moottorityyppi kauppamerenkulun aluksissa. DNV:n laatimien tilastojen (DNV 2024, 20; DNV 2023, 24; DNV 2022, 11) perusteella kappalemäärällisesti tarkasteltuna 98 % maa-

ilman kauppalaivastosta on varustettu perinteisiä polttoaineita hyödynnettävillä moottoreilla. Tilauskirjoissa muutokset ovat kuitenkin nähtävissä, missä kappalemäärällisesti polttoöljymoottorien osuus on ollut vuonna 2024 72,9 %, siinä missä vuonna 2023 osuus oli 73,8 % ja vuonna 2022 78,9 %. Määrällinen tarkastelu on yksi tapa lähestyä asiaa, mutta tuolloin pienen kokoluokan alukset asetetaan ympäristövaikutuksiltaan vastaaviksi hyvinkin suurten alusten kanssa. Näin ei todellisuudessa tietenkään ole, sillä suurten alusten liikuttelu vaatii moninkertaisesti energiaa. Yksinkertaista mittaria asiaan ei kuitenkaan ole löydettävissä.

Kokonaiskonetehto voisi olla yksi lähestymistapa, mutta tuolloin olisi huomioitava operoinninaikainen todellinen konekuormitus ja polttoaineen kulutus. Lastinkuljetuskapasiteetti voisi olla toinen mittari, mutta toteutunut operoinninaikainen kuormausaste voi poiketa huomattavastikin enimmäiskantavuudesta. Lisäksi rahdinkuljetuksessa käytettävissä oleva tila ja rahdin massa harvoin suhteutuvat toisiinsa optimaalisesti kuljetusalusta huomioiden. Matkustaja-alusten suhteen tilanne monimutkaistuu entisestään tyhjän tilan määrän kasvaessa suhteessa laskennalliseen kapasiteettiin. Yksi tapa vertailla aluksia keskenään on bruttovetoisuusluku (GT englannin kielen sanoista Gross Tonnage). Tämä luku on yleisesti käytetty meriliikenteessä, ja tämän vuoksi alusten bruttovetoisuustiedot ovat varsin avoimesti saatavissa. Esimerkiksi DNV on laatinut vastaavat tilastot myös bruttovetoisuuden näkökulmasta (DNV 2024, 20; DNV 2023, 24; DNV 2022, 11), ja kooste vuosien 2022–2024 käyttövoimista on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Polttoainetyyppien jakauma olemassa olevien alusten käyttövoimana bruttovetoisuuden suhteen vuosina 2022–2024.

Polttoainetyyppi	2024 (%)	2023 (%)	2022 (%)
Perinteiset polttoaineet	92,6	93,5	94,5
LNG	6,65	5,96	5,39
LPG	0,37	0,26	0,06
Akustot / hybridialukset	0,32	0,26	0,06
Metanoli	0,09	0,05	0,02
Vety	<0,01	0	0
Ammoniakki	<0,01	0	0

Lähteet: DNV 2024, 20; DNV 2023, 24; DNV 2022, 11.

Kuten taulukosta 1 on havaittavissa, perinteisillä polttoaineilla operoivien olemassa olevien alusten prosentuaalinen osuus maailman laivaston bruttovetoisuudesta on dominoiva, joskin hiljalleen laskeva. Vaikka aluskanta uudistuisikin, alusten pitkät käyttöiät pitävät käytännössä huolen siitä, että kovin nopeita muutoksia ei tapahdu. Toiseksi yleisin polttoainevaihtoehto on LNG, jonka osuus on ollut hienoisessa kasvussa. Taulukkoa katsoessa on kuitenkin syytä muistaa, että monet LNG-aluksista on varustettu monipolttoainemoottoreilla, joten operointi esimerkiksi MGO:lla onnistuu aina tarvittaessa. Myös hybridialuksissa akustot ovat lähinnä pääkoneiden tukena, tarkoitettu manoveeraukseen tai satamajaksoja varten, joten näiden alusten pääasiallinen polttoaine on aina jokin muu kuin sähkö. Nestekaasukäyttöisten alusten osuus on kasvanut hieman. Metanolin osuus on marginaalinen, mutta on syytä silti noteerata se kasvavana vaihtoehtona. Tämä tulee hyvin esiin DNV:n (DNV 2024, 20; DNV 2023, 24; DNV 2022, 11) koostamista tilauskirjatilastoista, jotka on esitelty taulukossa 2.

**Taulukko 2.** Polttoainetyyppien jakauma tilattujen alusten käyttövoimista bruttovetoisuuden suhteen perustuen DNV:n koostamiin tilauskirjatilastoihin vuosilta 2022–2024.

Polttoainetyyppi	2024 (%)	2023 (%)	2022 (%)
Perinteiset polttoaineet	50,5	48,7	66,8
LNG	35,81	40,3	30,2
LPG	1,92	2,24	1,52
Akustot / hybridialukset	1,39	0,80	0,02
Metanoli	9,68	8,01	1,45
Vety	<0,01	0	0
Ammoniakki	0,69	0	0

Lähteet: DNV 2024, 20; DNV 2023, 24; DNV 2022, 11.

Tilauskirjatilastoja tarkasteltaessa voidaan tehdä johtopäätöksiä tulevasista kehityksistä. Perinteisiä polttoaineita käyttävien moottoreiden osuus alusten voimanlähteistä on edelleen noin puolet kaikista tilatuista aluksista. LNG-alusten osuus on vuosien saatossa kasvanut, mutta vuonna 2024 osuus on pienempi verrattuna vuoteen 2023. Lähivuosina nähdään, onko tämä luonnollista vaihtelua vai mahdollinen trendin kääntyminen. Joka tapauksessa jos verrataan taulukon 1 lukuarvoihin, näkyy LNG-alusten suhteellisen suuri osuus tilattavista aluksista. Osin tämä johtuu siitä, että monet uudet risteilyalukset ovat LNG-aluksia ja niiden bruttovetoisuus on usein huomattavan suuri. Toisaalta on syytä muistaa, että monet näistä on lopulta varustettu monipolttoainemoottoreilla.

Taulukossa 2 metanolialusten osuus tilauskirjoissa on kasvanut huomattavan nopeasti. Siinä missä vuonna 2022 niiden osuus oli vain 1,45 % ja monilla moottorinvalmistajilla metanolimoottorityyppjä vasta lanseerattiin markkinoille, vuonna 2023 metanolialusten osuus tilauskirjoissa oli jo 8,01 % ja vuonna 2024 9,68 %. Tätä voi pitää huomattavana muutoksena tilanteessa, jossa meriliikenteessä täysin uusi polttoainetyyppi on nopeasti vallannut alaa tilauskirjoissa.

Tällä hetkellä metanolin valmistaminen on suhteellisen edullista (Hansson ym. 2019, 159–173; Solakivi ym. 2022, 6–7), mikäli valmistusprosessissa käytetään raaka-aineena maakaasua. Maakaasusta valmistettu metanoli perustuu vahvasti fossiilisiin raaka-aineisiin. Mikäli fossiilisista polttoaineista halutaan eroon, on myös metanolin valmistukseen käytettävä muita valmistusprosesseja. Biomassasta valmistettu biometanoli voi olla yksi ratkaisu. Prosessi voidaan myös teknisesti syntetisoida kokonaan. Näiden ratkaisujen kokonaiskestävyyteen on kuitenkin kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta todellinen päästövähennys varmasti toteutuu, eikä prosessien seurauksena haittavaikutuksia siirretä kasvihuonekaasuista esimerkiksi myrkkypäästöihin tai luontokatoon.

Kuvaan 1 metanolilinja on piirretty oikealle, ja tällä hetkellä pääasiassa fossiilista metanolia (mm. maakaasusta tuotettua metanolia) käyttävät vaihtoehdot ovat ilmestyneet meriliikenteeseen. Biometanolin tai synteettisen metanolin tuotanto on tällä hetkellä aivan liian vähäistä tarpeeseen nähden, mutta mikäli metanoli polttoaineena osoittautuisi muutoin kilpailukykyiseksi, siirtymä näihin vaihtoehtoihin fossiilisista raaka-aineista tuotetusta metanolista onnistuu suoraviivaisesti. Metanolin muita etuja nesteytettyihin kaasuihin nähden on helppo varastoitavuus. Kylmävarastointia ei tarvita, ja nestemäisenä polttoaineena sen käsittely on helpompaa verrattuna kaasuihin. Toisaalta metanolilla on polttoöljyjä ja LNG:tä alhaisempi energiatiheys, jonka vuoksi sen varastoiminen vie enemmän tilaa. Kuten LNG-moottorit myös metanolimoottorit ovat pääasiassa monipolttoainemoottoreita, joiden operointi onnistuu myös öljypolttoaineilla, kuten MGO:lla. Tämä antaa varustamoille joustavuutta, mikäli metanolin hintatasoon tai saatavuuteen tulisi ennakoimattomia muutoksia.

2010-luvulla LNG:n arvioitiin nousevan merkittäväksi meriliikenteen polttoaineeksi, mikä näkyy tällä hetkellä siinä, että LNG:n osuus globaalissa laivastossa on vuosien saatossa kasvanut (taulukko 1) ja tilauskirjoissa LNG-alusten osuus on huomattava (taulukko 2) verrattuna muihin vaihtoehtopolttoaineisiin. Kuvassa 1 nesteytettyjen kaasujen linja onkin piirretty huomattavasti paksummaksi verrattuna metanolilinjaan. Pääasiassa

LNG-aluksissa käytetty kaasupolttoaine on fossiilista metaania, mutta siirtymä biokaasuun on mahdollista toteuttaa joustavasti. Riittävän korkean metaaniluvun omaava biokaasu on kemiallisesti riittävän samankaltaista fossiiliseen kaasuun verrattuna, jolloin sen kylmäsäilytyksessä sekoitettavuudessa tai käsiteltävyydessä ei ole merkittäviä eroavuuksia. Osa LNG-aluksilla operoivista varustamoista pyrkiikin täyttämään FuelEU Maritimen -asetuksen (EU/2023/1805) määrittämän ensimmäisen 2 prosentin velvoitetason yksinkertaisesti seostamalla fossiiliseen kaasuun biokaasua. Biokaasun saatavuus ja tämän vuoksi hintataso (Solakivi ym. 2022, 3) muodostaa kuitenkin pullonkaulan kyseisen polttoaineen yleistymiselle. Toisaalta synteettisen metaanin valmistaminen vedystä ja hiilidioksidista mahdollistaa teknisesti tuotantokapasiteetin huomattavankin kasvattamisen, mikäli kysyntää metaanipolttoaineille on riittävästi. Joustavuuden eri vaihtoehtojen välillä mahdollistaa se, että metanoli-moottoreiden tapaan myös LNG-alusten moottorit ovat pääasiassa monipolttoainemoottoreita, joten käyttövoiman vaihto esimerkiksi MGO:hon onnistuu helposti.

Kuvassa 1 polttoöljyjä käyttävien moottoreiden palkki on piirretty näistä vaihtoehdoista paksuimmaksi. Tämä johtuu perinteisten polttoaineiden suuresta osuudesta (taulukko 1) sekä olemassa olevien alusten voimanlähteenä että edelleen tärkeimpänä moottorityyppinä alusten tilauskirjoissa (taulukko 2). Tällä hetkellä fossiiliset öljyt (erilaiset HFO-tai IFO-polttoainetuotteet tai MDO-/MGO-tuoteperheet) ovat tärkeimpiä polttoöljyjä, mutta bioöljyjen tuotekehitykseen ja tuotantoprosesseihin on panostettu enenevässä määrin. Perinteiset FAME-bioöljyt (Fatty Acid Methyl Esther) ovat olleet markkinoilla jo pidempään samoin kuin BTL-tyyppiset (Biomass to Liquid) tuotteet. Bioöljyjä on käytetty erityisesti seospolttoaineiden biokomponentteina, jolloin polttoainetonnin fossiilista osuutta on saatu laskettua bioöljyn osuuden verran. Lisäksi erilaisia uusiutuvia tai ei-biologisista lähteistä peräisin olevia ratkaisuja tällä saralla on useita. Esimerkiksi HVO-diesel tai synteettisesti tuotetut dieselöljyt ovat tällaisia.

Ammoniakkia on esitetty yhdeksi vaihtoehdoksi meriliikenteen käyttövoimaksi. Sen etuna on hiilivapaus, mutta erittäin myrkyllisenä aineena sen käyttöönotto ei ole ongelmatonta. Ongelmana on myös, että ammoniakin käytössä syntyy dityppioksidia ( $N_2O$ ), joka on erittäin voimakas kasvihuonekaasu. Dityppioksidipäästöjä voidaan kuitenkin hillitä ainakin jonkin verran moottoritekniikkaa kehittämällä (Zhou ym. 2024, 1–14). Toistaiseksi ammoniakkia polttoaineena käytäviä aluksia ei kauppamerenkulussa ole ollut, ja moottorinvalmistajienkaan tarjoamista vaihtoehdoista näitä

ratkaisuja ei juuri ole löytynyt. Ammoniakkimoottoreita kuitenkin kehitetään jatkuvasti ja ensimmäiset tuotteetkin on lanseerattu markkinoille. Tämä näkyy siinä, että vuonna 2024 ensimmäiset ammoniakkia käyttövoimanaan hyödyntävät alukset ovat ilmestyneet tilauskirjoihin (taulukko 2). Nämäkin oletettavasti tosin ovat monipolttoaineratkaisuja metanoli- ja kaasumoottoreiden tavoin. Tällä hetkellä on vaikea sanoa, millä aikataululla ammoniakki polttoaineena mahdollisesti yleistyisi. Sen vuoksi ammoniakki on merkitty kuvan 1 yläkulmaan, mutta on mahdollista, että se siirtyy lähivuosina yhdeksi käyttövoimapalkiksi kaasujen, polttoöljyjen ja metanolin rinnalle.

Kuvan 1 oikeaan ylälaitaan on merkitty myös ydinvoima. Se on jo suhteellisen vanha käyttövoimaratkaisu, jota on meriliikenteessä käytetty kuitenkin pääasiassa vain sotilasmerenkulussa, kuten lentotukialuksissa ja ydinsukellusveneissä. Kaupallisia ydinkäyttöisiä aluksia on pilotoitu, mutta ne eivät koskaan yleistyneet. Tähän vaikuttivat monet syyt, kuten merkittävät investointikustannukset, miehistöltä vaadittava erikoiskoulutus, ydinturvallisuus, polttoöljyjen hyvä ja halpa saatavuus sekä negatiiviset asenteet ydinenergiaa kohtaan. Mikäli SMR-reaktoreiden yleistyminen kuitenkin tapahtuisi ja niiden hinta saataisiin kohtuulliseksi, voi ydinvoimasta muodostua hiilivapaa meriliikenteen käyttövoima (DNV 2024, 51–52). On kuitenkin vaikea arvioida, milloin tämä käytännössä voisi tapahtua.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tällä hetkellä käyttövoimiin liittyviä riskejä pyritään minimoimaan valmistautumalla erilaisiin tulevaisuuden skenaarioihin. Polttoöljylinja on yksi skenaario, jossa luotetaan perinteisiin ratkaisuihin ja vihreä siirtymä pyritään toteuttamaan polttoaineita kehittämällä (FAME, BTL, HVO, muut bioöljyt, synteettinen diesel jne.). Polttoöljylinja on kuitenkin todellisuudessa vahvempi, sillä sekä kaasuetta metanolipolttoaineratkaisut ovat pääasiassa monipolttoaineraattoreita, monilla valmistajilla itse asiassa vielä polttoöljylle lähtökohtaisesti optimoituja. Nämä ratkaisut tarjoavat kuitenkin myös vaihtoehtoja. Kaasupolttoaineissa siirtymä biokaasuihin tai synteettisiin kaasuihin on aluksilla toteutettavissa helposti. Lisäksi kaasut palavat puhtaasti, jolloin tarvetta pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmille ei lähtökohtaisesti ole. Metanolilinja mahdollistaa siirtymän biometanoliin tai synteettiseen metanoliin, jolloin maakaasusta fossiilisena raaka-aineena päästäisiin eroon. Toisin kuin kaasut metanolimoottoreiden typen oksidien päästöt saadaan TIER III -tasolle yleensä vasta katalysaattoreiden avulla. Joka tapauksessa vaihtoehtoisten polttoaineiden ympäristövaikutusten arvioinnissa huomiota on kiinnitettävä enenevässä määrin valmistusprosessien aiheut-

tamiin ympäristövaikutuksiin. Tämä on iso muutos aiempaan verrattuna.

Parhaimmillaan markkinat löytävät optimaalisen ratkaisun, mutta aina näin ei käy. Joskus jostain ratkaisusta voi tulla standardinomainen pakotteen alan toimijat valitsemaan sen, vaikka se ei välttämättä olisi ominaisuuksiltaan edes paras vaihtoehto. Ympäristövaikutusten osalta asioita tarkasteltaessa on syytä muistaa myös tulevat, tällä hetkellä ei-tiedossa olevat tai muutoin vähätellyt haittavaikutukset. Nämä eivät tee investointipäätöksistä ainakaan yhtään helpompia.

# LÄHTEET

*Det norske veritas [DNV]. 2022. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2022. Hamburg: DNV AS.*

*Det norske veritas [DNV]. 2023. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2023. Hamburg: DNV AS.*

*Det norske veritas [DNV]. Maritime forecast to 2050. Energy transition outlook 2024. Hamburg: DNV AS.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetetus (EU) 2023/1804.*

*Euroopan parlamentin ja neuvoston asetetus (EU) 2023/1805.*

*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. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>.*

*Solakivi, T., Paimander, A. & Ojala, L. 2022. Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. *Transportation research part D: transport and environment* 113, 103500. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103500>.*

*Zhou, X., Li, T., Chen, R., Wei, Y., Wang, X., Wang, N., Li, S., Kuang, M. & Yang, W. 2024. Ammonia marine engine design for enhanced efficiency and reduced greenhouse gas emissions. *Nature communications* 15, 2110. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46452-z>.*

# LISÄLUKEMISTA

Hankkeen aikana on tuotettu seuraavat aihepiiriä käsittelevät julkaisut:

## **Yleistajuiset artikkelit:**

- Tanhuanpää. 2024. Merenkulun murros vaatii yhteistyötä. Xamk READ 3/24.
- Tanhuanpää. 2024. Liikenteen käyttövoimat murroksessa. Xamk READ 2/24.
- Altarriba. 2023. Merenkulun ympäristövaikutusten tutkiminen on pitkäjänteistä työtä. Xamk READ 4/23.
- Altarriba. 2023. Avoimen kierron rikkipesurit ovat tehokas, mutta kiistelty teknologia. Xamk READ 3B/23.
- Tanhuanpää. 2023. Vihreä siirtymä muuttaa merenkulkua valtavasti lähivuosisikymmeninä. Xamk READ 3B/23.
- Tanhuanpää. 2023. Xamkissa tutkitaan vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjoamia mahdollisuuksia. Xamk READ 3B/23.
- Altarriba. 2023. MERPOL perehtyy merenkulun energiamurrokseen. Xamk READ 2/23.

## **Vertaisarvioidut konferenssiartikkelit:**

- Tanhuanpää, Altarriba, Rahiala. 2024. Transition towards fossil-free energy sources in the shipping sector: a sustainability index analysis of methanol and liquefied biogas. 7<sup>th</sup> Conference on sustainable mobility, climate crisis and resilient transportation systems. Karditsa, Greece.
- Altarriba, Piispa, Tanhuanpää, Rahiala. 2024. On-board emission measurements on ships: Lessons learned, practical challenges, and opportunities. 10<sup>th</sup> International conference on maritime transport. Barcelona, Spain.
- Altarriba, Tanhuanpää, Rahiala. 2024. An analysis of the momentary sulfur emission peak of open-loop scrubbers applying the environmental index. In Guedes-Soares & Santos (eds.): Advances in maritime technology and engineering, vol. 2, CRC Press. 7<sup>th</sup> International conference on maritime technology and engineering. Lisbon, Portugal.
- Altarriba, Rahiala, Tanhuanpää. 2023. Open-loop scrubbers and restricted waterways: A case study investigation of Travemünde port and increased sulphur emissions immediately after the scrubbers are turned off. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, vol. 17(2), pp. 465–471. 15<sup>th</sup> International conference on marine navigation and safety of sea transportation. Gdynia, Poland.

**Vertaisarvioidut alkuperäisartikkelit:**

- Altarriba, Rahiala, Tanhuanpää. 2024. Comparative study of LNG/MGO emission levels on a ROPAX ship. *Journal of maritime research*, vol. 21(1), 140–152.
- Altarriba, Rahiala, Tanhuanpää, Piispa. 2023. Developing sustainable shipping and maritime transport: Multi-criteria analysis between emission abatement methods. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 238(2), 364–374.

**Opinnäytetyöt:**

- Valtonen. 2024. EU:n merenkulun ympäristösääntelyn mahdolliset vaikutukset merenkulun fossiilisten polttoaineiden hintoihin. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Lui. 2023. Alternative fuel emissions with regards to European union's emissions trading system and FuelEU proposal. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Xamk Tutkii -sarjassa ilmestyneet Logistiikka ja merenkulku -vahvuusalan julkaisut:

1. *Elias Altarriba*: Öljyn leviämisen estimointi arviointitaulukoiden avulla osana operatiivista öljyntorjuntatyötä Saimaalla. 2017.
2. *Justiina Halonen – Emmi Rantavuo – Elias Altarriba*: Öljyntorjuntakoulutuksen ja -osaamisen nykytila. SCAROIL-hankkeen selvitys öljyntorjunnan koulutustarpeista. 2017.
3. *Vesa Tuomala*: Maritime cybersecurity. Before the risks turn into attacks. 2021.
4. *Elias Altarriba* (toim.): Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. 2022.

