



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Matias Pohtola

Ympäristöllinen kestävä kehitys merenkulkualalla

Säätely ja polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöt

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Kandidaatintutkielma, tuotantotalous
Tekniikan kandidaatti

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Matias Pohtola	
Tutkielman nimi:	Ympäristöllinen kestävä kehitys merenkulkualalla: Sääntely ja polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöt	
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti	
Oppiaine:	Tuotantotalous	
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle	
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä: 33

TIIVISTELMÄ:

Tässä kandidaatintutkielmassa tarkastellaan merenkulkualan ympäristöllistä kestävää kehitystä ja keskitytään erityisesti kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden rooliin kestävä kehityksen saavuttamisessa. Meriliikenne on keskeinen osa maailmankauppaa ja tavaroita kuljetetaan ympäri maailmaa. Sen ympäristövaikutukset ovat kuitenkin johtaneet lisääntyneisiin sääntelytoimiin, joilla pyritään vähentämään päästöjä ja edistämään puhtaampia energiaratkaisuja.

Kestävä kehityksen käsitettä tarkastellaan sen kolmen keskeisen ulottuvuuden kautta, jotka ovat ympäristöllinen-, taloudellinen- ja sosiaalinen kestävyys. Tutkimuksessa korostetaan ympäristön kestävyttä meriliikenteen yhteydessä ja tuodaan esiin kansainvälisiä ja alueellisia sääntöjä, jotka muokkaavat alan siirtymistä kohti vihreämpiä käytäntöjä. Kansainvälisen merenkulkujärjestön ja Euroopan unionin kaltaisilla järjestöillä on merkittävä rooli sääntelytoimenpiteiden, kuten päästöjen valvonnan ja vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönoton kannustimien laatimisessa.

Vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten metanoli, ammoniakki ja vety, ovat saaneet huomiota mahdollisina ratkaisuin merenkulkualan riippuvuuden vähentämiseksi fossiilisista polttoaineista. Nämä vaihtoehdot tarjoavat niin mahdollisuuksia, kuin haasteita ympäristöllisen kestävä kehityksen kannalta.

Tässä tutkimuksessa luodaan yleiskatsaus merenkulkualan ympäristölliseen kestävyteen vaikuttaviin tekijöihin, kuten kasvihuonekaasupäästöihin ja mahdollisiin vaihtoehtoihin polttoaineratkaisuihin. Kestävä kehityksen sääntelyä tarkastellaan yleisesti, mutta myös merenkulun ympäristöllisen näkökulman kautta.

AVAINSANAT: Kestävä kehitys, merenkulku, kansainvälinen sääntely, polttoaine

Sisällys

1	Johdanto	6
1.1	Tutkimuksen tausta	6
1.2	Tutkimuksen tavoitteet	7
1.3	Tutkimusmenetelmä ja aiheen rajaus	7
2	Kestävä kehitys	8
2.1	Perusperiaate ja käsitteen syntyminen	8
2.2	Kestävän kehityksen kolme ulottuvuutta	9
2.2.1	Ympäristöllinen kestävä kehitys	9
2.2.2	Taloudellinen kestävä kehitys	12
2.2.3	Sosiaalinen kestävä kehitys	13
2.2.4	Kestävän kehityksen venn-diagrammi	13
2.3	Kestävän kehityksen sääntely	14
3	Ympäristöllinen kestävä kehitys merenkulkualalla	17
3.1	Merenkulun kansainvälinen sääntely	17
3.2	Merenkulun kasvihuonekaasupäästöt	20
3.3	Uudet polttoaineet edistämässä alan ympäristöllistä kestävää kehitystä	22
3.3.1	Metanoli	22
3.3.2	Ammoniakki	24
3.3.3	Vety	25
4	Yhteenveto	28
	Lähteet	30

Kuvat

Kuva 1. Hiilidioksidipäästöjen kasvu ajan saatossa (United States Environmental Protection Agency, 2024).	11
Kuva 2 Kestävä kehitys edellyttää tasapainoa kestävän kehityksen kolmen osa-alueen välillä (Caradonna, 2014, s. 8).	14
Kuva 3 Yhdistyneiden Kansakuntien 17 kestävän kehityksen tavoitetta (Suomen YK-liitto, n.d.)	15
Kuva 4 Kasvihuonekaasujen intensiteetin vähentäminen ajan kuluessa (European Commission, n.d.)	19

Lyhenteet

°C	celsiusaste
CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
N ₂ O	dityppioksidi
EU	European Union
EU ETS	European Union Emission Trading System
IMO	International Maritime Organization
YK	Yhdistyneet Kansakunnat

Termit

Bruttovetoisuus

mittayksikkö, joka kuvaa laivan kokonaistilavuutta kuutiometreissä, ottaen huomioon kaikki suljetut tilat

Fossiilinen polttoaine

polttoaine, joka on muodostunut biomassasta ja varastoitunut maaperään miljoonia vuosia sitten

Hiilidioksidiekvivalentti

mittayksikkö, joka ilmoittaa kasvihuonekaasujen yhteenlasketun ilmastovaikutuksen hiilidioksidiin verrattuna

Kasvihuonekaasu

ilmakehässä esiintyvä kaasu, joka absorboi ja säteilee lämpöenergiaa vaikuttaen ilmastoon

Kasvihuonekaasupäästöt

kasvihuoneilmiötä voimistavia kasvihuonekaasuja

Pilottipolttoaine

polttomoottorin apupolttoaine, joka auttaa ylläpitämään pääpolttoaineen palamista

Uusiutuva energianlähde

luonnonvarainen energiamuoto, joka uusiutuu luonnollisesti lyhyessä ajassa

1 Johdanto

Tässä johdantoluvussa esitellään tutkimuksen tausta, tutkimuksen tavoitteet, sekä miten tutkimus on toteutettu ja millä tavoin aihe on rajattu.

1.1 Tutkimuksen tausta

Merenkulun rooli globaalissa kaupankäynnissä on suuri, sen vastatessa yli 80 prosenttia kaikesta globaalista kaupankäynnistä vuonna 2024. Suurimmalle osalle tavaroista ja hyödykkeistä, niiden kuljettaminen laivoilla on kustannustehokkainta globaalissa kaupankäynnissä (United Nations, 2025). Vaikkakin tavaroiden kuljettaminen eri puolille maailmaa onkin kustannustehokasta laivoilla, niin liittyy siihen suuria ympäristövaikutuksia, kuten kasvihuonekaasupäästöjä. Yhdistyneiden Kansakuntien alaisen merenkulkua sääntelevän järjestön IMO:n viimeisimmän kasvihuonekaasuista tehdyn tutkimuksen mukaan merenkulku aiheutti 2,89 prosenttia kaikista maailman kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2018 (International Maritime Organization, 2020).

Kestävän kehityksen edistäminen on ollut avainasemassa viimeisenä vuosikymmenenä ja erityisesti kansainväliset sopimukset, kuten Pariisin ilmastopöytäkirja, kestävän kehityksen Agenda-2030 tavoitteet, sekä erityisesti merenkulkualaa ohjaava kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, ohjaavat merenkulkualaa kohti kestävämpiä toimintamalleja.

Kestävän kehityksen tutkiminen on tärkeää ja erityisesti yhdistettäessä se merenkulun kontekstiin, joka aiheuttaa merkittäviä kasvihuonekaasupäästöjä. Merenkulkualalla toimivien organisaatioiden on sopeuduttava kiristyvään sääntelyyn, joka aiheutuu ilmastomuutoksen hidastamisen toimista. Merenkulun uudet polttoaineratkaisut ovat keskeisessä asemassa edistämään alan ympäristöllistä kestävä kehitystä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen keskeiset tavoitteet ja tutkimuskysymykset pohjautuvat kestävän kehityksen tutkimiseen merenkulun kontekstissa. Tavoitteena on tutkia kestävän kehityksen teoriaa ja soveltaa sen ympäristöllistä näkökulmaa merenkulun kontekstiin.

Tavoitteena on tutkia mitä on kestävä kehitys ja miten sitä säännellään globaalisti yleisesti sekä merenkulun alalla, ja mitkä ovat keskeiset toimijat sääntelemään sitä. Tavoitteena on tutkia myös mitkä ovat merenkulun keskeisimpiä kasvihuonekaasupäästöjä, ja mistä nämä aiheutuvat sekä mitä vaikutuksia uusilla polttoaineratkaisuilla, kuten metanolilla, ammoniakilla ja vedyllä on näiden päästöjen vähentämisen kannalta ja mitä haasteita nämä uudet polttoaineratkaisut tuovat tästä näkökulmasta.

1.3 Tutkimusmenetelmä ja aiheen rajaus

Tutkimus on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus kestävän kehityksen ja merenkulun keskeiseen kirjallisuuteen ja muihin tutkimuksiin. Aiheen rajaus toteutetaan käsittelemällä kestävää kehitystä merenkulun kontekstissa erityisesti kestävän kehityksen ympäristöllisestä näkökulmasta, erityisesti merenkulun sääntelyn ja polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta.

2 Kestävä kehitys

Tässä luvussa esitellään kestävän kehityksen peruseriaatteet ja sen kolme ulottuvuutta. Nämä kestävän kehityksen kolme ulottuvuutta ovat ekologinen-, taloudellinen- ja sosiaalinen kestävyys. Kolmantena alalukuna tutkitaan kestävän kehityksen globaalia sääntelyä.

2.1 Peruseriaate ja käsitteen syntyminen

Suurimmalle osalle opiskelijoista käsitys kestävydestä pohjautuu Maailman ympäristö- ja kehityskomission laatimaan Brundtlandin raporttiin (Portney, 2015, s. 2). Tässä Brundtlandin raportissa määritellään kestävän kehityksen olevan kehitystä, joka täyttää ihmiskunnan nykyiset tarpeet vaarantamatta tulevien sukupolvien mahdollisuutta täyttää omia tarpeitansa tulevaisuudessa (World Commission on Environment and Development, 1987). Portneyn (2015, s. 3) mukaan tämä Brundtlandin raportin kuuluisa määritelmä on sopiva lähtökohta tälle melko abstraktille konseptille. Toisaalta tämä Brundtlandin raportin lyhyt määritelmä kestäväälle kehitykselle voi olla myös harhaanjohtava. Se on saanut monet ihmiset näkemään kestävän kehityksen keskittyvän pääasiassa sukupolvien väliseen tasa-arvoon (Robert ja muut, 2005, s. 10–11).

WCED (1987, s. 41) esittää, että kestävän kehityksen määritelmä voidaan jakaa kahteen alakonseptiin. Näistä ensimmäinen on ihmisten tarpeiden käsite, erityisesti maailman köyhien tarpeet tulisi asettaa etusijalle. Toinen WCED:n raportissa (1987, s. 41) esitetty idea on rajoitteet, joka pohjautuu ajatukseen ympäristön kantokyvyn suojelemisesta teknologian ja organisaatioiden voimin. WCED (1987) painottaa erityisesti taloudellisen kasvun, oikeudenmukaisuuden ja ympäristönsuojelun tasapainottamista. Näitä kestävän kehityksen kolmea osa-aluetta tarkastellaan luvussa 2.2.

Kestävä kehitys on monelle tuttu käsite, mutta itse ajatuksen ja termin kehitys voi olla monelle vieras. Kestävän kehityksen käsitteen juuret ulottuvat ainakin niin pitkälle kuin

1600-luvun loppupuolelle (Caradonna, 2014, s. 6). Caradonna (2014, s. 6) mukaan idea kestävästä kehityksestä syntyi kirjoittajien keskuudessa vasta Brundtlandin raportin julkaisemisen jälkeen, vaikka todellisuudessa kestävä kehitys on ollut olemassa jo pitkään ennen termin tutuksi tuleamista. Käsite kestävyys on ollut käytössä jo 1700-luvun alkupuolella, kun anglosaksit käyttivät termiä "Nachhaltigkeit" kuvaamaan metsän puiden käyttöä ja niiden uudelleen kasvua (Caradonna, 2014, s. 21). Siirryttäessä teollisen vallankumouksen aikaan Caradonna (2014, s. 69–70) mukaan paras esimerkki ekologisesta kritiikistä kyseisenä aikana on Friedrich Engelsin 1845 kirjoittama kirja "The Condition of the Working Class in England in 1844". Engels tutkii kirjassaan muun muassa teollisuuden aiheuttamia vesistöjen ja ilman saastumista, joka aiheutti terveystilanteen erityisesti köyhille (Caradonna, 2014, s. 70). Engelsin työ loi ennakkotapauksen teollistuneen talouden kustannuksiin puuttumiseen, kuten köyhyyteen, saastumiseen, lapsityövoimaan ja ihmisarvon vastaisiin elinoloihin (Caradonna, 2014, s. 71).

2.2 Kestävän kehityksen kolme ulottuvuutta

Kestävän kehityksen konsepti jaetaan kolmeen eri ulottuvuuteen, jotka ovat ympäristöllinen-, taloudellinen- ja sosiaalinen kestävyys (WCED, 1987). Kestävä kehitys saavutetaan suojelemalla luontoa, säilyttämällä taloudellinen kasvu ja kehitys, sekä edistämällä tasa-arvoa (Portney, 2015, s. 6). Näitä kestävä kehityksen ulottuvuuksia tarkastellaan tässä alaluvussa.

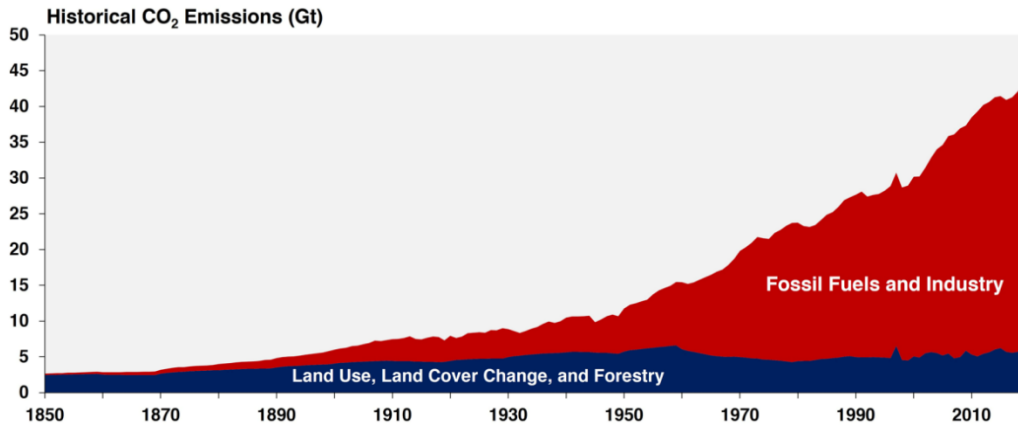
2.2.1 Ympäristöllinen kestävä kehitys

Ympäristöllisen kestävä kehityksen käsite perustuu siihen, miten ympäristömme säilyy tuottavana ja kestäväna tukeakseen ihmiselämää (Mensah, 2019, s. 10). Kestävällä kehityksellä ja asumassamme ympäristössä on vahva yhteys (Roosa, 2010, s. 81). Roosan (2010, s. 81) mukaan kestävä kehitys liitetään ainakin ihmismäärän kasvuun, fossiilisten polttoaineiden käyttöön, metsienhoitoon, kalastukseen, ilmaston saastuttamiseen, ilmaston lämpenemiseen, lajien monimuotoisuuteen ja sukupuuttoon. Tämä kaikki

vaikuttaa ympäristöömme, jossa elämme. Roosan (2010, s. 81) mukaan luonnon pysyvä saastuttaminen on vastakohta kestävyydelle.

Ilmastonmuutos on keskeinen asia, joka liittyy ympäristölliseen kestäväan kehitykseen. Ilmaston luonnollinen vaihtelu aiheuttaa maapallon ilmaston vaihtelua, niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä ja tällaista syklistä vaihtelua on aina ollut olemassa (Wong, 2015, s. 5). Wong kirjoittaa teoksessaan (2015, s. 5) maapallon ilmaston muuttuneen kuitenkin kohti jyrkkää lämpenemisen trendiä. Ilmastonmuutos tarkoittaa lämpötilan ja sääolojen pitkän aikavälin muutoksia, jotka johtuvat esimerkiksi auringon aktiivisuuden muutoksista (UN, n.d.). 1800-luvulta lähtien ihmisen toiminta, kuten fossiilisten polttoaineiden käyttö on ollut suurin tekijä ilmaston lämpenemiseen (UN, n.d.). Myös IPCC:n (2013) julkaiseman raportin mukaan on erittäin todennäköistä ilmaston lämpenemisen aiheutuneen pääasiassa ihmisen toiminnan vaikutuksesta 1900-luvun puolivälistä alkaen.

Ilmastonmuutos aiheutuu kasvihuonekaasuilmästä, joka on seurausta auringonvalon heijastumisesta ilmakehässä olevien kasvihuonekaasujen vaikutuksesta takaisin kohti maapallon pintaa aiheuttaen ylimääräisen energian siirtymisen maapallon pinnalle (Wong, 2015, s. 33). Päästöjä aiheuttavia kasvihuonekaasuja ovat CO₂, CH₄, kloorifluorihilivedyt, halonit ja N₂O, joita kaikkia syntyy sekä teollisuus- että valmistustoiminnan seurauksena (Roosa, 2010, s. 92). Kuvassa 1 on esitettyä, miten hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet ajan saatossa globaalisti teollistumisen myötä.



Kuva 1. Hiilidioksidipäästöjen kasvu ajan saatossa (United States Environmental Protection Agency, 2024).

Ilmaston lämpeneminen ilmastonmuutoksen seurauksena on globaali huolenaihe. Ilmastonmuutos aiheuttaa laajaa häiriötä luonnossa vaikuttaen samalla miljardien ihmisten elämään ympäri maailmaa (IPCC, 2022, s. 1). Ilmastonmuutos aiheuttaa esimerkiksi merenpintojen nousua, jäätiköiden sulamista ja myrskyjen voimistumista (Roosa, 2010, s. 108). Myös sään ääri-ilmiöt, kuten tulvat ja kuivuus yleistyvät ja ne altistavat miljoonat ihmiset akuutille elintarvike- ja vesipulalle erityisesti Afrikassa, Aasiassa, Keski- ja Etelä-Amerikassa, pienillä saarilla ja arktisilla alueilla (IPCC, 2022, s. 1).

Ympäristölliseen kestäväan kehitykseen liittyy myös hyvin läheisesti luonnonvarojen kestävä käyttö. Kuvasta 1 huomataan fossiilisten polttoaineiden käytön aiheuttaneen merkittävän lisäyksen hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärään vuosien saatossa. Kestävän energian konsepti on kehittynyt ajatukselle siitä, että fossiiliset polttoaineet loppuvat maailmasta ja tästä aiheutuu vakavia seurauksia, ellei vaihtoehtoisia ratkaisuja energian tuottamiseen löydetä (Portney, 2015, s. 14). Portney (2015, s. 14) kirjoittaa näiden fossiilisten resurssien olevan kestävättömiä, niiden polttamisesta aiheutuneiden ympäristöpäästöjen vuoksi. Hän jatkaa kirjoittaen yhden suurimmista kestäväan kehityksen haasteista olevan tarve energianlähteille, joiden avulla tuotetaan lämpöä ja sähköä. Portney (2015, s. 37) kirjoittaa myös fossiilisista polttoaineista siirtymisen uusiutuviin energialähteisiin olevan keskeinen asia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi.

2.2.2 Taloudellinen kestävä kehitys

Taloudellisen kestävä kehityksen idea on sama kuin kestävä kehityksen ylipäättään, mutta tällä näkökulmalla kiinnitetään huomio kestävä kehitykseen talouden näkökulmasta. Keskeinen kysymys taloudelliselle kestävä kehitykselle on se, miten voidaan täyttää nykyiset taloudelliset tarpeet vaikuttamatta siihen, että nämä samat tarpeet voidaan täyttää myös tulevaisuudessa (Ikerd, 2012, s. 1). Ikerd (2012, s. 1) kirjoittaa kestävä talouden kyettävä säilyttämään tuottavuutensa ja arvonsa ikuisesti yhteiskunnalle.

Kantava voima talouskasvulle on uusi teknologia ja nämä teknologiat tarjoavat mahdollisuuksia hidastaa vaarallisen nopeaa rajallisten luonnonvarojen kulumista (WCED, 1987, s. 14). Ikerd (2012, s. 109) kirjoittaa ensimmäisen askeleen kohti yhteisymmärrystä talouden kestävydestä olevan ymmärtäminen siitä, että talous, jota motivoi ja ohjaa talouskasvun tavoite ei ole kestävä. Suurin osa ihmisistä, jotka asuvat kehittyneissä maissa eivät tarvitse enempää talouskasvua, sillä heidän taloutensa jo nyt ylituottavat täyttääkseen yhteiskuntiansa ihmisten tarpeet (Ikerd, 2012, s. 112). WCED:n (1987, s. 16) mukaan kestävä kehitys edellyttää, että kaikilla ihmisillä tulee olla tasapuoliset mahdollisuudet toteuttaa tarpeitansa. Köyhyyden ollessa yleistä maailmassa on se aina altis ekologisille ja muille ongelmille (WCED, 1987, s. 16).

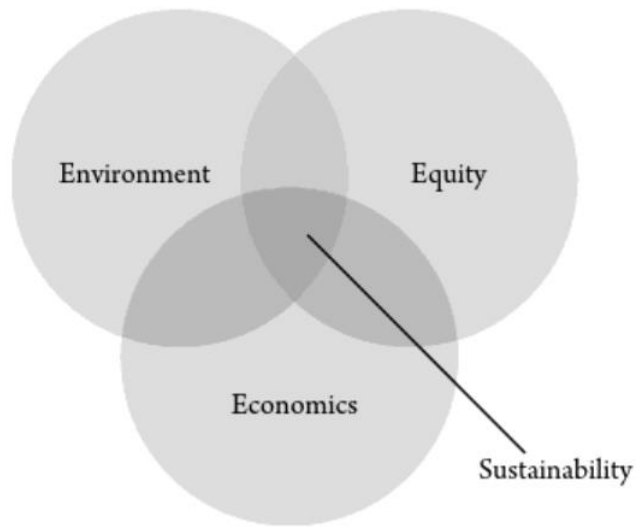
Taloudelliseen kestävä kehitykseen liittyy läheisesti myös uusiutumattomien ja uusiutuvien luonnonvarojen käyttö. WCED:n (1987, s. 43) raportin mukaan taloudelliseen kasvuun ja kehitykseen liittyy luonnollisia muutoksia ekosysteemeissä, eikä kaikkia ekosysteemejä voida säilyttää koskemattomina. Tämän raportin mukaan esimerkiksi metsän ja kalakantojen käytön on pysyttävä luonnollisen uusiutumisen rajoissa ollakseen kestävä (WCED, 1987, s. 43).

2.2.3 Sosiaalinen kestävä kehitys

Kolmas kestävän kehityksen keskeisistä osa-alueista on sosiaalinen näkökulma. Kestävässä kehityksessä ollaan kiinnostuneita yhtä lailla sosiaalisesta kestävydestä, kuin ympäristöllisestä kestävydestä (Caradonna, 2014, s. 13). Caradonna (2014, s. 13) mukaan tämä sosiaalinen näkökulma tiivistetään usein ihmisten hyvinvoinniksi, tasa-arvoksi, demokratiaksi ja oikeudenmukaisuudeksi ja näiden asioiden keskinäiseksi yhteydeksi. Kestävyden sosiaaliseen ulottuvuuteen kuuluu useita tekijöitä, kuten resurssien oikeudenmukainen jakautuminen, yhtäläiset mahdollisuudet kaikille kansalaisille, sosiaalinen oikeudenmukaisuus, terveys, henkinen hyvinvointi ja kyky elää turvallista ja mielekästä elämää (Caradonna, 2014, s. 13).

2.2.4 Kestävän kehityksen venn-diagrammi

Viime vuosina yleisin kestävän kehityksen malli on kolmijakoinen venn-diagrammi, mikä havainnollistaa näiden kestävän kehityksen kolmen osa-alueen keskinäistä yhteyttä (Caradonna, 2014, s. 8). Tämä Venn-diagrammi on esitetty kuvassa 2. Tämä malli hyväksyttiin Yhdistyneiden Kansakuntien huippukokouksessa vuonna 2005 ja se esiintyy lukemattomissa kirjoissa, verkkosivuilla ja ekologisissa malleissa (Caradonna, 2014, s. 8).



Kuva 2 Kestävä kehitys edellyttää tasapainoa kestävän kehityksen kolmen osa-alueen välillä (Caradonna, 2014, s. 8).

2.3 Kestävän kehityksen sääntely

Vuosituhattavoitteet olivat kahdeksan Yhdistyneiden Kansakuntien jäsenten hyväksymää tavoitetta, jotka oli tarkoitus saavuttaa vuoteen 2015 mennessä. (World Health Organization, 2018). Syyskuussa vuonna 2000 YK:ssa solmittiin sopimus Vuosituhattajulistus, jossa maailman johtajat sitoutuivat torjumaan köyhyyttä, nälänhätää, lukutaidottomuutta, ympäristön pilaantumista ja naisten syrjintää (WHO, 2018). Vuosituhattavoitteet ovat johdettu tästä julistuksesta.

Vuonna 2015 kansainvälinen yhteisö hyväksyi joukon uuden kehitysohjelman kannalta keskeisiä maailmanlaajuisia sopimuksia, jotka olivat vuosituhattavoitteiden korvaaminen, kestävän kehityksen tavoitteiden hyväksyminen, uusi kehys kestävän kehityksen rahoittamiselle ja oikeudellisesti sitova maailmanlaajuinen ilmastopimus (Walker ja muut, 2019, s. 2).

Tämä tunnettu kestävän kehityksen sääntelykehys on Yhdistyneiden Kansakuntien laatima Agenda 2030. Se on toimintasuunnitelma ihmisten, planeetan ja hyvinvoinnin hyväksi (United Nations, n.d.). Tämän toimintasuunnitelman mukaan tavoitteena on vuoteen 2030 mennessä poistaa köyhyys ja nälänhätä maailmasta, edistää rauhaa ja tasa-arvoa, suojella ympäristöä varmistamalla samalla kestävä talouskasvu maailmassa (UN, n.d.). Agenda 2030 luotiin vuonna 2015 ja silloin päätettiin 17:sta uudesta kestävän kehityksen tavoitteesta (UN, n.d.). Nämä 17 Yhdistyneiden Kansakuntien laatimaa kestävän kehityksen tavoitetta ovat kuvassa 3.



Kuva 3 Yhdistyneiden Kansakuntien 17 kestävän kehityksen tavoitetta (Suomen YK-liitto, n.d.)

Kestävän kehityksen tavoitteiden on tarkoitus toimia oppaana sekä kehittyneille- ja kehittyville valtioille ja niissä yhdistyy konkreettiset kehitystavoitteet, kuten köyhyyden

vähentäminen, ihmisoikeuksien suojeleminen, sekä kysymykset liittyen ympäristöön ja ilmastomuutokseen (Walker ja muut, 2019, s. 123).

Vuonna 2015 allekirjoitettiin myös historiallinen Pariisin ilmastopöytäkirja COP21 (Walker ja muut, 2019, s. 123). Tällä sopimuksella pyritään vahvistamaan maailmanlaajuisia toimia ilmastomuutoksen hidastamista vastaan osana kestävästä kehityksestä pyrkimiseen yhteydessä (UN, 2015, s. 4). Tämän Pariisin ilmastopöytäkirjan mukaan maapallon lämpötila pidetään alle 2 °C:ssa verrattuna esiteolliseen aikaan ja jatketaan pyrkimystä rajoittaa lämpötilan nousua yli 1,5 °C esiteolliseen aikaan verrattuna, sillä tämä vähentäisi merkittävästi riskejä ja ilmastomuutoksen vaikutuksia (UN, 2015, s. 4).

3 Ympäristöllinen kestävä kehitys merenkulkualalla

Tässä osiossa perehdytään kestäväen kehityksen ympäristölliseen näkökulmaan merenkulkualalla. Tutkimuksen kohteena on miten merenkulkualan ympäristöllistä kestävää kehitystä säännellään, ja mitkä ovat keskeiset sääntelevät toimijat ja sopimukset edistämään kasvihuonekaasujen vähentämistä merenkulusta. Tarkastelussa on myös merenkulun kasvihuonekaasupäästöt ja vaihtoehtoiset uudet polttoaineratkaisut edesauttamaan alan ympäristöllistä kestävää kehitystä.

3.1 Merenkulun kansainvälinen sääntely

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO perustettiin vuonna 1948 Yhdistyneiden Kansakuntien erityisjärjestönä, ja se on maailmanlaajuinen standardisoimisviranomainen, joka valvoo kansainvälisessä liikenteessä olevien alusten turvallisuutta ja ympäristövaikutuksia (Attard ja muut, 2016, s. 7). Attardin ja muiden (2016, s. 7) mukaan IMO:n ensisijainen tehtävä on luoda sääntelykehys merenkulkualalle ja pitää se ajan tasalla uusien tarpeiden mukaan. Paras tapa parantaa meriturvallisuutta on kehittää kansainvälisiä sääntöjä, joita kaikki noudattavat, ja 1800-luvun puolivälistä lähtien on hyväksytty useita tällaisia sopimuksia (IMO, n.d.).

Seuraavaksi esitellään tärkeimpiä IMO:n laatimia säännöksiä kestäväen kehityksen ympäristöllisestä näkökulmasta. Kansainvälinen yleissopimus alusten aiheuttaman meren pilaantumisen ehkäisemisestä, eli MARPOL-sopimus on tärkein kansainvälinen yleissopimus, joka koskee alusten aiheuttaman, toiminnallisen tai onnettomuuksista johtuvan meriympäristön pilaantumisen ehkäisemistä (IMO, n.d.). Vuoden 1978 MARPOL-pöytäkirjaa laajennettiin käsittelemään ilmakehän pilaantumisen liittyviä kysymyksiä vuoden 1997 pöytäkirjalla (Attard ja muut, 2016, s. 7). Nykyisessä muodossaan tämä sopimus sisältää 6 liitettä, jotka kattavat öljyn aiheuttaman merien pilaantumisen ehkäisemistä koskevat säännökset, määräykset irtolastina kuljetettavien haitallisten nestemäisten aineiden aiheuttaman merien pilaantumisen torjunnasta,

pakkauksissa meritse kuljetettavien haitallisten aineiden aiheuttaman merien pilaantumisen ehkäisemisen, alusten jätevesien ja jätteiden aiheuttaman merien pilaantumisen ehkäisemisen, ja alusten aiheuttaman ilman pilaantumisen ehkäisemisen (IMO, n.d.).

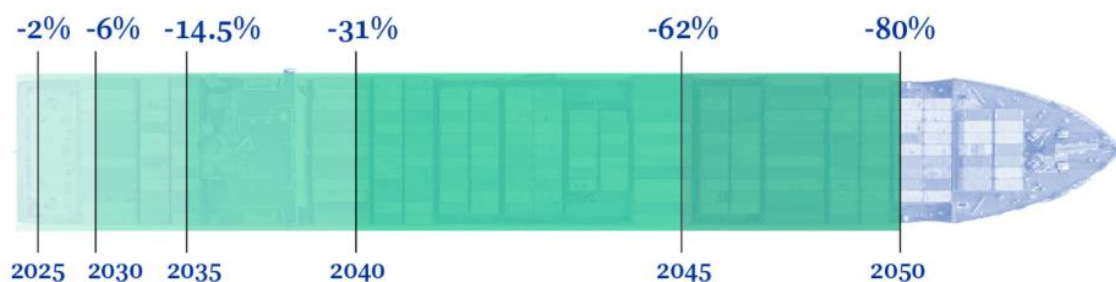
IMO:n jäsenvaltiot hyväksyivät heinäkuussa 2023 alusten kasvihuonekaasupäästöjä koskevan IMO:n strategian 2023, johon sisältyy tehostettuja tavoitteita haitallisten päästöjen torjumiseksi (IMO, n.d.). Pyrkimyksenä on saavuttaa nollapäästöt merenkulussa vuoteen 2050 mennessä ja sitoutuminen varmistaa vaihtoehtoisten päästöttömien tai lähes päästöttömien polttoaineiden käyttöönotto vuoteen 2030 mennessä (Leary, 2024, s. 2). IMO:n (2023) mukaan tavoitteena on vähentää hiilidioksidipäästöjä keskiarvallisesti vähintään 40 prosenttia vuoteen 2030 mennessä vuoteen 2008 verrattuna ja merenkulun nollapäästöjen saavuttaminen viimeistään vuonna 2050 tai lähellä tätä vuotta, erilaiset kansalliset olosuhteet huomioon ottaen. Leary (2024, s. 2) kirjoittaa, ettei vuonna 2024 ole neuvoteltu uusista merkittävistä ympäristöä koskevista säännöksistä IMO:n osalta ja vuonna 2023 laadittu strategia on viimeisin.

Myös Euroopan unioni sääntelee kansainvälistä merenkulkua. Tammikuusta 2024 lähtien EU:n päästökauppajärjestelmä, eli EU ETS on laajennettu kattamaan kaikkien EU:n satamiin saapuvien suurten alusten hiilidioksidipäästöt riippumatta siitä, minkä lipun alla ne purjehtivat (European Commission, n.d.). Tällä järjestelmällä vaaditaan saastuttajia maksamaan kasvihuonekaasupäästöistään, mikä auttaa vähentämään EU:n kokonaispäästöjä tuottaen samalla tuloja vihreän siirtymän rahoittamiseksi (European Commission, n.d.) Euroopan komission (European Commission, n.d.) mukaan tämä järjestelmä kattaa 50 prosenttia EU:n ulkopuolelta alkavien tai päättyvien matkojen päästöistä ja 100 prosenttia päästöistä, jotka syntyvät kahden EU:n sataman välillä ja alusten ollessa EU:n satamissa. EU:n päästökauppajärjestelmä kattaa tällä hetkellä hiilidioksidipäästöt, mutta vuodesta 2026 alkaen myös metaani- ja dityppioksidipäästöt (European Commission, n.d.). Laivavarustamojen on ostettava EU:n

päästökauppajärjestelmän päästöoikeuksia kutakin tonnia kohti, joka vastaa EU:n päästökauppajärjestelmään kuuluvia hiilidioksidipäästöjä (European Commission, n.d.). Sujuvan siirtymisen mahdollistamiseksi varustamoiden on luovutettava päästöoikeuksia vain osalle päästöistään alkuvaiheen käyttöönottojakson aikana, 40 prosenttia vuonna 2024 raportoiduista päästöistä, 70 prosenttia vuonna 2025 ilmoitetuista päästöistä ja vuodesta 2027 alkaen 100 prosenttia raportoiduista päästöistä (European Commission, n.d.).

Toinen merkittävistä EU:n säännöksistä on FuelEU Maritime-asetus. Tämä asetus edistää uusiutuvien, vähähiilisten polttoaineiden ja puhtaan energiateknologian käyttöä aluksissa, mikä on välttämätöntä alan hiilidioksidipäästöjen vähentämisen tukemiseksi (European Parliament and Council, 2023). Tällä asetuksella asetetaan enimmäisrajat Euroopan satamissa käyvien, yli 5000 bruttovetoisuutta olevien alusten keskimääräiselle vuotuiselle kasviuonekaasujen intensiteetille riippumatta minkä lipun alla ne operoivat (EPC, 2023). Yli 5000 bruttovetoisuutta olevia aluksia on kaikista maailman aluksista 55 prosenttia ja nämä muodostavat noin 90 prosenttia merenkulun globaaleista hiilidioksidipäästöistä (EPC, 2023). Tämän asetuksen tavoitteilla varmistetaan, että alalla käytettävien polttoaineiden kasviuonekaasujen intensiteetti vähenee asteittain ajan mittaan kuvan 4 mukaisesti (EPC, 2023).

Annual average carbon intensity reduction compared to the average in 2020



Kuva 4 Kasviuonekaasujen intensiteetin vähentäminen ajan kuluessa (European Commission, n.d.)

3.2 Merenkulun kasvihuonekaasupäästöt

Merenkulku aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä monilla eri tavoilla, kuten pakokaasuista, huoltotoimista, kylmäainevuodoista ja muista kuljetettujen lastien vuodoista (Shi, 2016, s. 20–21). Tässä tutkimuksessa keskitymme pääasiassa merenkulun polttoaineiden ja niiden poltossa vapautuvien keskeisten kasvihuonekaasujen tutkimiseen.

Merenkulku on tärkeä osa maailmanlaajuisista kaupankäyntiä, sillä se kattoi yli 80 prosenttia kaikista kansainvälisistä kaupankäyntitoimista vuonna 2024 (YK, n.d.). Laivakuljetus on useimmiten kustannustehokkain tapa kuljettaa tavaroita ja hyödykkeitä eri puolille maailmaa (YK, 2025). Vaikka laivakuljetus on edullista, siihen liittyy merkittäviä ympäristöhaittoja, kuten kasvihuonekaasupäästöjä. IMO:n tutkimuksen mukaan merenkulku aiheutti 2,89 prosenttia maailman kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2018 (IMO, 2020). Toisaalta vuonna 2018 meriliikenne- ja sisävesiliikenteen osuus EU:n liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärästä oli 13,5 prosenttia, mikä on selvästi vähemmän kuin tieliikenteen ja ilmailun osuus (European Environment Agency, 2021, s. 4).

Kasvihuonekaasujen pääsijaisena lähteenä merenkulussa on laivojen polttoaineiden pakokaasupäästöt, jotka ovat peräisin laivojen pää- ja apumoottoreista, kattiloista ja polttolaitoksista (Shi, 2016, s.20). Öljypolttoaineiden käyttö merenkulussa alkoi noin 1900-luvulla ja jatkuu edelleen, mutta niiden käyttöä vähennetään kohti vuotta 2050 (Herdzik, 2023, s. 83). Herdzik kirjoittaa tyypillisimpien nestemäisten meriliikenteen polttoaineiden 1900-luvulta lähtien olleen kaasuoöljy (MGO), dieselöljy (MDO) ja raskas polttoöljy (HFO). Noin vuodesta 2000 lähtien myös nesteytetty maakaasu (LNG) on yleistynyt laivojen polttoaineena ja se näyttää olevan siirtymäkauden polttoaine siirryttäessä kohti päästöttömämpiä vaihtoehtoja (Herdzik, 2023, s. 86). Kuitenkin vielä vuonna 2018 HFO on ollut edelleen hallitseva polttoaine kansainvälisessä merenkulussa, sen vastatessa 79 prosenttia kaikesta polttoaineen kulutuksesta (IMO, 2020, s. 7).

IMO:n viimeisimmän kasvihuonekaasuja käsittelevän tutkimuksen mukaan (2018, s. 76) koko merenkulun kasvihuonekaasupäästöt ovat kasvaneet 977 miljoonasta hiilidioksidiekvivalentti tonnista 1076 miljoonaan hiilidioksidiekvivalentti tonniin aikavälillä 2012–2018. Näihin päästöihin lukeutuu mukaan kasvihuonekaasupäästöt, kuten hiilidioksidi-, metaani ja dityppioksidipäästöt.

Shi (2016, s. 21) jaottelee kirjassaan laivojen päästöt suoriin- ja epäsuoriin päästöihin sen mukaan, miten ne liittyvät polttoon, jossa suorilla päästöillä tarkoitetaan polttoaineen palamisen tuloksia ja epäsuorilla päästöillä palamattomista lähteistä peräisin olevia päästöjä. Tämän tutkimuksen kannalta oleellisia ovat suorat päästöt. Näistä suorista päästöistä Shi (2016, s. 21) mainitsee ensimmäiseksi hiilidioksidin, jota syntyy laivoissa dieselpohjaisen polttoaineen hiilen hapettumisen sivutuotteena. Toinen suora päästötyyppi on dityppioksidin, jota syntyy myös palamisen yhteydessä (Shi, 2021, s. 21). Kolmantena suorana palamiseen liittyvänä päästönä Shi (2016, s. 21) mainitsee metaanin, jota pidetään yhdessä dityppioksidin kanssa vain vähäisenä päästölähteenä.

Hiilidioksidi on suurin kasvihuonekaasupäästötyyppi, jota syntyy meriliikenteessä käytettyjen polttoaineiden käyttämisestä (EEA, 2021, s. 4). Myös Shin (2016, s. 22) mukaan muut laivojen kasvihuonekaasupäästöt ovat ilmaston lämpenemispotentiaalin kannalta vähemmän merkittäviä.

Kysymys siitä, miten kasvihuonekaasupäästöjä vähennetään, tulkitaan usein suppeasti niin, että sillä tarkoitetaan kansainvälisen merenkulun hiilidioksidipäästöjen vähentämistä, sillä hiilidioksidipäästöt ovat hallitseva kasvihuonekaasupäästö tällä sektorilla (Shi, 2016, s. 22). Seuraavassa alaluvussa 3.3 perehdytään tarkemmin, kuinka juuri näitä päästöjä pystytään vähentämään uusien polttoaineratkaisuiden avulla ja mitä uusia huomioitavia päästöjä ja haasteita uusien polttoaineratkaisuiden myötä tulee ilmi.

3.3 Uudet polttoaineet edistämässä alan ympäristöllistä kestävä kehitystä

Ympäristöajattelun takia energiamarkkinoilla on meneillään vallankumous, johon luetaan mukaan myös merenkulun polttoaineet (Herdzik, 2023, s. 84). Uusien polttoaineratkaisuiden kehittäminen ja käyttöönotto on keskeisessä asemassa merenkulun kasviuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta. Tässä alaluvussa tutustutaan muutama mahdolliseen merenkulun polttoaineeseen kestävä kehityksen ympäristöllisestä näkökulmasta, erityisesti kasviuonekaasupäästöjen vähentämisen kannalta. Nämä tässä alaluvussa esiintyvät polttoaineet ovat metanoli, ammoniakki ja vety.

Lloyd's Register (2023, s. 4) arvioi tutkimuksessaan merenkulun eri polttoaineyhdistelmäennusteiden jakautuvan kahteen luokkaan, jossa toisessa skenaariossa vetyyn perustuvien polttoaineiden osuus on suurempi vuoteen 2050 mennessä ja toisessa skenaariossa biopolttoaineiden osuus on suurempi vuoteen 2050 mennessä. Molemmissa skenaarioissa metanolin markkinaosuuden ennustetaan olevan pienempi, kuin ammoniakin ja biometaanin, mikä on ristiriidassa nykyisten kasvavien monipolttoainetta käyttävien metanolilaivojen tilausten kanssa (Lloyd's Register, 2023, s. 6). Vuoteen 2050 mennessä Lloyd's Register (2023, s. 6) ennustaa metanolin markkinaosuuden olevan keskimäärin 13,4 prosenttia ja optimistisessa skenaariossa jopa 43 prosenttia merenkulussa käytetyistä polttoaineista. Optimistinen skenaario edellyttää kuitenkin merkittävää lisäystä globaalissa metanolin tuotannossa vastaamaan kaikkien sektoreiden kysyntää (Lloyds's Register, 2023, s. 6).

3.3.1 Metanoli

Metanoli, jota kutsutaan myös metyylialkoholiksi, on saatavana maailmanlaajuisesti, ja sitä on käytetty monissa eri tarkoituksissa ja sovelluksissa jo vuosikymmeniä (American Bureau of Shipping, 2021, s. 2). Kaupallisessa mittakaavassa sitä tuotetaan pääasiassa

maakaasusta, mutta sitä voidaan tuottaa myös uusiutuvista energialähteistä, kuten biomassasta tai uusiutuvalla energialla toimivasta elektrolyysistä ja kummankin tavan yleistyessä voitaisiin vähentää huomattavasti hiilidioksidipäästöjä (ABS, 2021, s. 2).

Poltetun biometanolin hiilidioksidipäästöjä pidetään ilmastoneutraaleina, sillä biomassaan perustuvasta polttoaineesta vapautuva hiilidioksidi poistuu ilmakehästä, kun uutta biomassaa kasvaa polttoaineen tuottamiseen käytetyn biomassan tilalle (IMO, 2016, s. 13). IMO:n mukaan metanolin polton CO₂-päästöt perustuvat polttoaineen hiilipitoisuuteen megajoulea kohden. IMO:n tutkimuksessa metanolin palamisesta aiheutuu 69 grammaa CO₂-päästöjä yhtä megajoulea poltettua metanolia kohden.

Metanolilla on kaikista nestemäisistä polttoaineista korkein vedyn ja hiilen suhde, mikä alentaa hiilidioksidipäästöjä sen polttamisessa moottorissa verrattuna tavanomaisiin polttoöljyihin (ABS, 2021, s. 2). Polttovaiheen CO₂-päästöt riippuvat käytetyn metanolin hiili- ja rikkipitoisuudesta, kun taas CH₄- ja N₂O-päästöt perustuvat lämpötilaan ja palamiseen (IMO, 2016, s. 16). Lisäksi IMO:n tutkimuksen (2016, s. 17–18) mukaan elinkaaren aikaiset typen oksidien päästöt vähenevät noin 55 prosenttia ja rikkidioksidipäästöt noin 92 prosenttia, kun käytetään metanolia verrattuna tavanomaisiin polttoaineisiin.

Metanolin kasvihuonekaasupäästöjä arvioitaessa on tärkeä ottaa huomioon myös ne päästöt, jotka aiheutuvat tuotantoprosessista (ABS, 2021, s. 2). Maakaasulla tuotetun metanolin suurimmat päästöt aiheutuvat metanolin tuotannosta ja sen polttamisesta laivan moottorissa (IMO, 2016, s. 16). Metanolin polton ja metanolin tuotannon päästöt perustuvat maakaasun ja metanolin kemialliseen koostumukseen, joten näiden päästöjen vaihtelu on vähäistä, kun taas maakaasun louhinnasta ja kuljetuksesta aiheutuvat päästöt voivat vaihdella merkittävästi sen mukaan, missä maakaasu on tuotettu (IMO, 2016, s. 16). IMO:n mukaan nämä louhinnasta ja kuljetuksesta aiheutuvat päästöt ovat kuitenkin pieniä verrattuna poltosta ja tuotannosta aiheutuviin päästöihin.

3.3.2 Ammoniakki

Ammoniakki on ilmakehän lämpötilassa ja paineessa väritön kaasu, jolla on tyyppillisesti pistävä haju (European Maritime Safety Agency, 2023, s. 15). Se on myös myrkyllinen ja syövyttävä aine (EMSA, 2023, s. 15).

Monet pitävät ammoniakkiä vallitsevana pitkän aikavälin ratkaisuna merenkulun polttoaineeksi ja sen vuoksi sen pitkän aikavälin ympäristövaikutuksia on tärkeä arvioida (Lloyd's Register, 2023, s. 20). Ammoniakkia tuotetaan tällä hetkellä pääasiassa lannoiteteollisuuteen, mutta tulevaisuudessa ammoniakilla odotetaan olevan tärkeä rooli merenkulun polttoaineena (Lloyd's Register, 2023, s. 21).

Ammoniakin tuotanto perustuu veden hajottamiseen vedyksi, jossa vety yhdistetään sen jälkeen typen kanssa, jolloin saadaan ammoniakkiä (EMSA, 2023, s. 22). Ammoniakin kasvihuonekaasupäästöt riippuvat siitä, mitä tuotantoprosessia on käytetty. Käytettäessä fossiilisia polttoaineita ammoniakin tuotantoon, kutsutaan näin tuotettua ammoniakkiä harmaaksi- tai ruskeaksi ammoniakiksi tuotannossa syntyneiden hiilidioksidipäästöjen vuoksi (Wärtsilä, 2023). EMSA:n (2023, s. 29) mukaan ammoniakkiä tuotetaan tällä hetkellä vielä enimmäkseen fossiilisista polttoaineista, kuten maakaasusta.

Siniseksi ammoniakiksi kutsutaan puolestaan ammoniakkiä, jonka tuotantoon on lisätty hiilidioksidin talteenottojärjestelmä ja vihreäksi ammoniakiksi ammoniakkiä, joka on tuotettu käyttämällä uusiutuvia energialähteitä, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa (Wärtsilä, 2023). Wärtsilän (2023) mukaan ammoniakin käyttäminen polttoaineena vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vain sen ollessa vihreää ammoniakkiä. EMSA:n (2023, s. 33) mukaan vihreän ammoniakin kasvihuonekaasupäästöt ovat 91 prosenttia harmaata ammoniakkiä alhaisemmat aina sen tuotannosta polttamiseen ja verrattaessa vihreän ammoniakin kasvihuonekaasupäästöjä raskaan polttoöljyn kasvihuonekaasupäästöihin, niin ovat vihreän ammoniakin kasvihuonekaasupäästöt 85 prosenttia alhaisemmat.

Ammoniakin poltosta ei synny hiilidioksidipäästöjä, sillä se ei sisällä hiiltä, mutta ammoniakin poltossa syntyy kuitenkin muita kasvihuonekaasuja, kuten dityppioksidia (EMSA, 2023, s. 30). Sen muodostuminen on potentiaalinen riski, sillä se on jopa voimakkaampi kasvihuonekaasu, kuin hiilidioksidi tai metaani (EMSA, 2023, s. 30). EMSA:n (2023, s. 30) mukaan pienikin määrä dityppioksidipäästöjä, joita muodostuu ammoniakin polton aikana voi kumota ammoniakin positiivisen vaikutuksen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä ajatellen. Wärtsilä (2023) kertoo verkkosivuillaan ammoniakin keskeisen haasteen olevan, miten dityppioksidipäästöjä käsitellään, jotta ammoniakista saadaan kestävä ratkaisu merenkulun polttoaineena. Ammoniakin poltto köyhdyttää myös epäsuorasti otsonikerrosta, sillä sen polttamisessa muodostuu typpiyhdisteitä ilmakehään (EMSA, 2023, s. 32).

Vihreän synteettisen ammoniakin tuotantoteknologia on tällä hetkellä ongelma, eikä se kykene kilpailemaan siksi öljypolttoaineiden kanssa (Herdzik, 2023, s. 86). Herdzik (2023, s. 86–87) kirjoittaa ammoniakin valmistusteknologian kehittyessä ammoniakista tulevan siirtymäajan polttoaine siirryttäessä kohti vedyn käyttöä polttoaineena. Hänen mukaansa vedyn poltossa käytetyt polttokennot näyttävät olevan tulevaisuuden ratkaisu, mitä ihmiset odottavat.

3.3.3 Vety

Vety on normaaliolosuhteissa väritön, hajuton ja mauton suhteellisen reagoimaton ja erittäin helposti syttyvä kaasu, jota esiintyy luonnossa tyypillisesti joko veden tai metaanin yhdisteenä (ABS, 2021, s. 1).

Yleisesti vetyä tuotetaan muuntamalla maakaasua tai hiiltä vetykaasuksi ja hiilidioksidiksi, mutta pitkän aikavälin kestävyystavoitteiden kannalta oleellista on, että sitä voidaan tuottaa myös uusiutuvien energialähteiden ja elektrolyysin avulla (ABS, 2021, s. 1). ABS (2021, s. 2) jakaa tutkimuksessaan vedyn ruskeaan-, harmaaseen-, siniseen- ja vihreään

vetyyn sen tuotantomenetelmän mukaan. Ruskeaa vetyä tuotetaan hiilen avulla, harmaata vetyä muiden fossiilisten polttoaineiden tai maakaasun avulla, sinistä vetyä fossiilisten polttoaineiden avulla, jossa käytetään lisäksi päästöjen vähentämisteknologioita, kuten hiilidioksidin talteenottojärjestelmiä (ABS, 2021, s. 2). Vihreää vetyä tuotetaan uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- tai tuulivoiman ja elektrolyysin avulla vettä käyttäen, jolloin saadaan tuotettua lähes päästötöntä vetyä (ABS, 2021, s. 2).

Maakaasusta tuotettu harmaa vety on tällä hetkellä ensisijainen vedyn tuotantomenetelmä ja se vastaa 75 prosenttia vedyntuotannosta (ABS, 2021, s. 3). Ruskea vety vastaa puolestaan 23 prosenttia ja vihreä vety vain 2 prosenttia (ABS, 2021, s. 3).

Sinisen vedyn tuotanto on edelleen riippuvainen fossiilisista polttoaineista, joten se aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä, kuten metaanipäästöjä, mikä on kasvihuonekaasuna paljon voimakkaampi, kuin hiilidioksidi (EMSA, 2023, s. 16). EMSA:n (2023, s. 16) mukaan sinistä vetyä pidetään siirtymäkauden ratkaisuna kohti vihreää vetyä.

Vety ei sisällä ollenkaan hiiltä, joten se ei aiheuta poltettaessa ollenkaan kasvihuonekaasupäästöjä (EMSA, 2023, s. 28). Myös ABS (2021, s. 2) kirjoittaa tutkimuksessaan vedyn voivan olla täysin hiilidioksidipäästötön polttoaine, kun sitä käytetään polttokennossa tai monipolttoaineisessa polttomoottorissa. Kuitenkin polttomoottoreita käyttävät vetykäyttöiset alukset aiheuttavat silti vähän kasvihuonekaasupäästöjä, mikäli käytetään hiilipohjaisia pilottipolttoaineita (EMSA, 2023, s. 28). Käytettäessä polttokennoja pilottipolttoainetta ei tarvita (EMSA, 2023, s. 28). Vetykäyttöisten alusten päästöt riippuvat moottorijärjestelmästä sekä käytettyjen pilottipolttoaineiden määrästä ja tyyppistä (EMSA, 2023, s. 31).

Vaikka itse vety ei ole kasvihuonekaasu, on se silti pienin olemassa oleva molekyyli ja näin ollen se voi vuotaa suhteellisen helposti, mikäli vedyn kuljettamiseen ja varastointiin ei käytetä sopivaa infrastruktuuria (EMSA, 2023, s. 29). IPCC ei ole toistaiseksi vielä kvantifioinut vedyn aiheuttamaa välillistä ilmaston lämpenemistä, mutta sen laatimassa Sixth Assessment Reportissa se tunnustaa tämän vaikutuksen olemassaolon (EMSA, 2023, s. 29).

4 Yhteenveto

Kestävä kehitys perustuu kolmeen ulottuvuuteen ympäristölliseen-, taloudelliseen- ja sosiaaliseen kestävyys. Kestävä kehitys korostaa ympäristön suojelemisen, talouskasvun ja sosiaalisen vastuun tasapainottamista. YK:n Agenda 2030:n ja Pariisin ilmastopöytäkirjan kaltaiset sääntelykehykset ohjaavat kansainvälisiä kestävyyspyrkimyksiä, joilla pyritään hillitsemään ympäristövaikutuksia, kuten kasvihuonekaasupäästöjä ja edistämään samalla pitkän aikavälin kehitystä.

Ympäristön kestävyydellä on keskeinen merkitys ilmastonmuutoksen hillitsemisessä, joka johtuu kasvaneista ihmistoiminnan kasvihuonekaasupäästöistä. Päästöjen vähentäminen edellyttää sääntelytoimenpiteitä, teknologisia innovaatioita ja siirtymistä fossiilisista polttoaineista vaihtoehtoisiin energialähteisiin. Meriliikenne aiheuttaa merkittävän osan maailmanlaajuisista kasvihuonekaasupäästöistä ja se joutuu kohtaamaan kasvavaa sääntelypainetta Kansainvälisen merenkulkujärjestön ja Euroopan unionin kaltaisten organisaatioiden taholta. Nämä organisaatiot ovat ottaneet käyttöön päästövähennysstrategioita, kuten polttoainesäännöksiä ja päästökauppajärjestelmiä, edistääkseen alan kestävyttä.

Merenkulkualan on siirryttävä perinteisistä fossiilisista polttoaineista vaihtoehtoisiin, vähäpäästöisiin polttoaineisiin. Metanoli, ammoniakki ja vety on tunnistettu eräiksi keskeisiksi vaihtoehdoiksi. Metanolia on jo saatavilla, ja sen hiilidioksidipäästöt ovat alhaisemmat kuin perinteisten meriliikenteen polttoaineiden, mutta tuotantovaiheen hiilidioksidipäästöt luovat haasteita sen kestävyydelle. Ammoniakki ei tuota hiilidioksidipäästöjä, mutta siihen liittyy tuotannon hiilidioksidipäästöihin ja polttovaiheen dityppioksidipäästöihin liittyviä haasteita. Vety voi olla päästötön polttoaine, mutta tällä hetkellä sitä tuotetaan vielä käyttämällä maakaasua.

Vaihtoehtoisten polttoaineiden ympäristöhyödyt riippuvat pitkälti niiden tuotantomenetelmistä, kun otetaan huomioon polttoaineen päästövaikutukset aina niiden tuottamisesta polttamiseen. Tällä hetkellä kaikki edellä esitetyt polttoaineet

tuotetaan suurelta osin fossiilisista polttoaineista, mikä rajoittaa niiden kestävyyssetuja. Siirtyminen uusiutuviin energialähteisiin perustuviin tuotantomenetelmiin on olennaisen tärkeää, jotta meriliikenteessä voidaan saavuttaa todellisia päästövähennyksiä.

Ympäristön kannalta kestävän kehityksen saavuttaminen meriliikenteessä edellyttää kokonaisvaltaista lähestymistapaa, jossa yhdistyvät kansainväliset sopimukset ja sääntely, vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönotto ja teknologinen kehitys. Vaikka haasteita on edelleen, tiukemmilla säännöksillä ja uusilla polttoaineratkaisuilla on keskeinen rooli merenkulkualan kestävän kehityksen edistämässä.

Lähteet

- American Bureau of Shipping. (2021). *Sustainability Whitepaper: Hydrogen as Marine Fuel*. Noudettu 20.3.2025 osoitteesta <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/whitepapers/hydrogen-as-marine-fuel-whitepaper-21111.pdf>
- American Bureau of Shipping. (2021). *Sustainability Whitepaper: Methanol as Marine Fuel*. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/publications/whitepapers/Sustainability-Methanol-as-Marine-Fuel.pdf>
- Attard, D. F., Fitzmaurice, M., Hamza, R., & Martinez, N. (2016). *The IMLI manual on international maritime law*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/law/9780199683949.001.0001>
- Caradonna, J. L. (2014). *Sustainability: A history*. Oxford University Press. Noudettu 10.2.2025 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=1745809>
- European Commission. (n.d.). *Decarbonising maritime transport – FuelEU Maritime*. Noudettu 9.3.2025 osoitteesta https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en
- European Commission. (n.d.). *Reducing emission from the shipping sector*. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en
- European Environment Agency. (2021) *EMTER – Facts and Figures*. Noudettu 19.3.2025 osoitteesta <https://emsa.europa.eu/publications/item/4515-emter-facts-and-figures.html>
- European Maritime Safety Agency. (2023) *Potential of Ammonia as Fuel in Shipping*. Noudettu 20.3.2025 osoitteesta <https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>

- European Maritime Safety Agency. (2023) *Potential of Hydrogen as Fuel for Shipping*.
Noudettu 21.3.2025 osoitteesta
<https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/5062-potential-of-hydrogen-as-fuel-for-shipping.html>
- European Parliament and Council. (2023). *Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC*.
Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1805>
- Herdzik, J. (2023). *Marine fuel from past to the future*. *Zeszyty Naukowe of the Maritime University of Szczecin*, 74(146), 83-90. <https://doi.org/10.17402/567>
- Ikerd, J. (2012). *The Essentials of Economic Sustainability*. Lynne Rienner Publishers.
<https://doi.org/10.1515/9781565495173>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *IPCC Press Release*. Noudettu
3.3.2025 osoitteesta
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/press/IPCC_AR6_WGII_PressRelease-English.pdf
- International Maritime Organization (n.d.). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta
[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)
- International Maritime Organization (2016). *Methanol as Marine Fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility*. Noudettu 20.3.2025
osoitteesta <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/METHANOL-AS-MARINE-FUEL-ENVIRONMENTAL-BENEFITS-TECHNOLOGY-READINESS-AND-ECONOMIC-FEASIBILITY.pdf>
- International Maritime Organization (2021). *Fourth IMO GHG Study 2020*. Noudettu
14.3.2025 osoitteesta
<https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents>

[/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20-%20Full%20report%20and%20annexes.pdf](#)

- International Maritime Organization (2023). *2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships (Resolution MEPC.377(80))*. Noudettu 10.3.2025 osoitteesta <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>
- Leary, D. (2024). *International Maritime Organization (IMO)*. Yearbook of international environmental law, 34(1). <https://doi.org/10.1093/yiel/yvae024>
- Lloyd's Register (2023). *The future of maritime fuels. What you need to know*. Noudettu 19.3.2025. osoitteesta https://maritime.lr.org/l/941163/2023-09-04/86cyj/941163/1693881339KV19NyGO/LR_Fuel_Mix_Report_v1.pdf
- Mensah, J. (2019). Sustainable development: Meaning, history, principles, pillars, and implications for human action: Literature review. *Cogent Social Sciences*, 5(1). <https://doi.org/10.1080/23311886.2019.1653531>
- Portney, K. E. (2015). *Sustainability*. MIT Press. Noudettu 6.2.2025 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=4397950>.
- Robert, K. W., Parris, T. M., & Leiserowitz, A. A. (2005). What is Sustainable Development? Goals, Indicators, Values, and Practice. *Environment: science and policy for sustainable development*, 47(3), 8-21. <https://doi.org/10.1080/00139157.2005.10524444>
- Roosa, S. A. (2010). *Sustainable Development Handbook (2nd Edition)*. River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003151562>
- Shi, Y. (2016). *Climate Change and International Shipping: The Regulatory Framework for the Reduction of Greenhouse Gas Emissions*. Boston: Brill. <https://doi.org/10.1163/9789004329317>
- Suomen YK-liitto. (n.d.). *Kestävän kehityksen tavoitteet*. Noudettu 7.3.2025 osoitteesta <https://www.ykliitto.fi/kestava-kehitys>
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Noudettu 3.3.2025 osoitteesta <https://sdgs.un.org/2030agenda>

- United Nations. (2015). The Paris Agreement. Noudettu 7.3.2025 osoitteesta https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (n.d.). *Global Greenhouse Gas Overview*. Noudettu 9.2.2025 osoitteesta <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-overview>
- Walker, J. I., Pekmezovic, A., & Walker, G. (2019). *Sustainable Development Goals: Harnessing Business to Achieve the Sustainable Development Goals Through Technology, Innovation and Financing*. John Wiley & Sons, Incorporated. <https://doi.org/10.1002/9781119541851>
- Wong, K. V. (2015). *Climate Change*. Momentum Press. Noudettu 9.2. 2025. osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/detail.action?docID=4307182>
- World Commission on Environment and Development & Brundtland, G. H. (1987). *Our common future*. Noudettu 11.2.2025 osoitteesta <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- World Health Organization (2018). Millenium Development Goals (MDGs). Noudettu 7.3.2025 osoitteesta. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-\(mdgs\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-(mdgs))
- Wärtsilä. (2023). *Ammonia as marine fuel? It is easier if you do it smart*. Noudettu 20.3.2025 osoitteesta <https://www.wartsila.com/insights/article/ammonia-fuel-for-thought-in-our-deep-dive>