

Eino Viitanen

NOLLAPÄÄSTÖINEN ALUS

Merenkulun insinöörin koulutusohjelma

2019

## NOLLAPÄÄSTÖINEN ALUS

Viitanen, Eino  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Merenkulun insinöörin koulutusohjelma  
Huhtikuu 2019  
Sivumäärä: 32  
Liitteitä: -

Asiasanat: meriliikenne, päästöt, polttokenno, aurinkokenno, biokaasu, biodiesel, uusiutuvat energianlähteet

---

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin eri keinoja merenkulun tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Maailmankaupasta valta-osa kulkee meriteitse, sekä liikenteen määrän odotetaan kasvavan huomattavasti lähivuosina. Siksi päästöjen leikkaaminen onkin erityisen tärkeää ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jossa tarkasteltiin kolmea eri vartenotettavaa vaihtoehtoa päästöttömän energian tuotantoon laivaolosuhteissa. Tutkimuksen kohteina olivat bioenergia, polttokennot sekä aurinkoenergia.

Merenkulun osuus maailman kasvihuonekaasupäästöistä on noin 2,8 %. Määrä on pieni, mutta sen odotetaan kasvavan tulevina vuosina lähes kymmeneen prosenttiin. Nykyistä päästökäytystä säätelevät rikki- ja typpioksidipäästörajoitukset sekä aluksen energiatehokkaaseen suunnitteluun tähtäävä EEDI ja energiatehokkaaseen johtamiskulttuuriin pureutuva SEEMP.

Bioenergiasta otettiin käsittelyyn biokaasu sekä biodiesel. Biokaasu voisi korvata nestetytetytyn maakaasun käyttöä. Kaasujen koostumuksista saadaan hyvin samanlaisia, kun biokaasua jatkojalostetaan. Biokaasu sopii olemassaolevaan LNG infrastruktuuriin. Biodieseliä tuotetaan eloperäisistä biomassoista. Biodiesel on yksi tutkituimmista bioenergioista ja sen kaupallinen käyttö on mahdollista.

Polttokennoista käsiteltiin kolmea eri tyyppiä. Vetykäyttöinen PEMFC-polttokenno on paras vaihtoehto päästöttömälle energiantuotannolle. MCFC ja SOFC -polttokennot taas pystyvät hyödyntämään fossiilisia- ja biopoltoaineita. Aurinkokennojärjestelmät sopivat vain lisäenergianlähteeksi tai vedyn tuottamiseen.

## ZERO-EMISSION VESSEL

Viitanen, Eino  
Satakunta University of Applied Sciences  
Degree Programme in Marine Engineering  
April 2019  
Number of pages: 32  
Appendices: -

Keywords: marine transport, emissions, fuel cell, solar cell, biogas, biodiesel, renewable energies

---

This thesis dealt with different ways to reduce greenhouse gas emissions from shipping. Most of the global cargo flows by seaways and the volume of this traffic is expected to grow significantly in the next few years. That's why cutting emissions is particularly important to keep the climate change in control. The work was carried out as a literature review, which looked at three different viable alternatives to emission-free energy production in ship conditions. The study focused on bioenergy, fuel cells and solar energy.

Shipping accounts for about 2.8% of global greenhouse gas emissions. The amount is small but it's expected to grow to almost 10% in the coming years. Existing emission trends are regulated by sulfur and nitrogen oxide emission limits and by EEDI for energy efficient design of the ship and an energy-efficient management code SEEMP.

From bioenergy biogas and biodiesel was studied. Biogas could replace the use of liquefied natural gas. The composition of the gases are very similar when the biogas is further processed. Biogas is suitable for existing LNG infrastructure. Biodiesel is produced from organic biomass. Biodiesel is one of the most studied bioenergy and it's commercial use is possible.

From fuel cells, three different types were studied. The hydrogen-powered PEM fuel cell is the best option for zero emission energy production. Meanwhile, the MC and SO fuel cells are able to utilize fossil and biofuels. Solar cell systems are only suitable for additional energy or hydrogen production onboard.

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	TUTKIMUSMENETELMÄT .....	6
2.1	Tutkimusmenetelmät .....	6
2.2	Aineistonkeruu .....	6
2.3	Rajaukset .....	7
3	MERENKULUN PÄÄSTÖT .....	7
3.1	Päästöt .....	7
3.2	Päästövaikutukset .....	8
3.3	Päästörajoitukset .....	10
4	VAIHTOEHTOJA .....	12
4.1	Bioenergia .....	12
4.1.1	Biodiesel .....	12
4.1.2	Biokaasu .....	14
4.2	Polttokenno .....	15
4.2.1	PEMFC-polttokenno .....	16
4.2.2	MCFC-polttokenno .....	17
4.2.3	SOFC-polttokenno .....	18
4.3	Aurinkoenergia .....	18
4.3.1	Paneelin rakenne .....	19
4.4	Energiatehokkuuden parantaminen .....	21
4.4.1	Nopeuden vähentäminen .....	21
4.4.2	Pohjakaasvillisuus ja -eliöstö .....	22
5	KÄYTÄNNÖN ESIMERKKEJÄ .....	22
5.1	VG EcoCoaster .....	22
5.2	M/T Tern Sea .....	23
5.3	M/S Viking Lady .....	24
5.4	Tûranor PlanetSolar .....	25
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	26
	LÄHTEET .....	29

# 1 JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden aikakausi alkaa olla loppuillaan. Öljynviejämaiden järjestö OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) arvioi vuonna 2017 maailman raakaöljyvarantojen kokonaistilavuudeksi noin 1 500 miljardia barreilia (OPEC 2019). Öljy-yhtiö BP arvioi varantojen riittävän noin 50 vuodeksi (BP 2019). Fossiilisten polttoaineiden riittävyys tai riittämättömyys ei ole päivänselvää. Fossiilisten polttoaineiden käyttö lisää merkittävästi ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Tämä osaltaan lisää kiinnostusta vaihtoehtoisiin ja uusiutuviin energiamuotoihin. Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on jo pitkään todennut ongelman fossiilisten polttoaineiden käytössä.

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on etsiä ja koota eri vaihtoehtoisia menetelmiä aluksen energiantuotannolle. Aluksi esittelen ongelman, eli ilmakehään pääsevät päästöt globaalista meriliikenteestä. Päästöjen seurauksien ja rajoitusten arviointia käsittelem samassa luvussa. Teoriaosuus koostuu eri kirjallisuuslähteistä kootusta tiedosta biopohjaisten polttoaineden valmistuksesta ja koostumuksesta, kolmen eri polttokennovaihtoehdon toiminnan kuvauksesta ja selostuksesta, sekä katsauksesta aurinkoenergiaan. Esittelen myös jo nyt käytössä olevia uusiutuvia energiamuotoja hyödyntäviä aluksia. Viimeinen luku kokoaa havainnot yhteen, jossa vertailen ja pohdin vaihtoehtoja.

Ilmastonmuutos poikkeaa paljon muista ihmiskuntaa aikaisemmin kohdanneista ympäristöongelmista. Ilmastonmuutoksen haasteet ja vaikutukset ovat aikaisempia kriisejä huomattavampia ja sen vaikutukset maailmanlaajuisia. Tarvitaankin nyt visionääristä ja innovatiivista ajattelua ilmastonmuutoshaasteisiin vastaamiseen. (Virtanen 2011, 41.)

## 2 TUTKIMUSMENETELMÄT

### 2.1 Tutkimusmenetelmät

Kvalitatiivisessa eli laadullisessa tutkimuksessa aineistonkeruuvaiheessa yksityiskohtaisten kysymysten laatiminen on hankalaa. Jos tarkkoja kysymyksiä voitaisiin laatia, kyseessä ei olisi enää laadullinen tutkimus vaan määrällinen tutkimus. Laadullinen tutkimus antaa mahdollisuuden ilmiöiden syvälliseen pohtimiseen ja näin ollen laadullinen tutkimus on aina uusien teorioiden ja mallien perustana. Kvalitatiivisen tutkimuksen päättely on induktiivista, eli edetään havainnoista tuloksiin. Tiedon analysoinnin työkalu on itse tutkija, jonka kautta aineisto suodattuu tutkimustuloksiksi. (Kananen 2017, 32-36.)

Kvalitatiivisessa aineistonkeruussa käytetään käsitettä saturaatio viittaamaan aineiston määrään. Tämä tarkoittaa, että tutkija kerää aineistoa päättämättä kuinka monta tapausta tutkimukseen sisällyttää. Aineistoa voidaan pitää riittävänä eli saturoituneena, kun samat asiat alkavat toistua aineistossa. (Hirsijärvi, Remes & Sajavaara 2015, 181-182.) Suuren aineiston käsittelyssä rajauksia tarvitaan aina. Ilman rajaamista laajoja aiheita ei voida hallita hyvin tai niistä tulee pinnallisia. (Kananen 2017, 57.)

### 2.2 Aineistonkeruu

Opinnäytetyö on kirjallisuuskatsaus, ja laaja kirjallisuuteen perehtyminen on edellytys saturaation saavuttamiseksi. Painettua kirjallisuutta etsin Satakunnan ammattikorkeakoulun Rauman kampuksen ja Turun Yliopiston matemaattis-tekniillisen tiedekunnan Quantum kirjastoista. Painetut lähteet olivat osaltaan suhteellisen vanhoja, mutta niin ovat myös tutkittavat ilmiöt. Fysikaalisten ilmiöiden määritelmät perustuvat luonnontieteisiin, joiden lait ovat tutkimuksen toteutusajankohtana edelleen vallitsevia. Tuoreimpien aineistoiden etsinnässä turvauduin internettiin ja Finna-palvelun asiasanahakuun.

## 2.3 Rajaukset

Tiedonkeruuvaiheessa tutkija joutuu päättämään, mitä aineistoja hän valitsee työhönsä käytettäväksi (Kananen 2017, 17). Aloittelevan tutkijan yleinen virhe on liian laajan aiheen valinta (Hirsijärvi ym. 2015, 81). Rajaamisella varmistutaan riittävän tiedon saannista, jotta voidaan käyttää tieteellisiä analysointimenetelmiä (Kananen 2017, 59).

Opinnäytetyöni käsittelee puhtaita vaihtoehtoja energiantuotannolle. Siksi rajasin teoreettisesta viitekehyksestä pois ydinfissiioon perustuvat järjestelmät sekä nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan käyttävät alukset. Jätin pois myös tuulivoiman. Päästöjä käsittelevä luku käsittelee merenkulun ilmastopäästöjä, ei muita päästönlähteitä, kuten öljyiset jätteet tai jätevedet.

## 3 MERENKULUN PÄÄSTÖT

### 3.1 Päästöt

Merikuljetukset ovat elintärkeitä maailmankaupalle ja globalisaatiolle. Meriteitse kulkee noin 90 prosenttia tavaroiden volyymista (IMO 2015, 4). Suuresta rahtimäärästä huolimatta merenkulun kokonaispäästöt eivät ole kovinkaan suuret verrattuna maailman kokonaispäästöihin. Taulukosta 1 näemme merenkulun kokonaispäästöjen olevan vuosittaisella tasolla noin 2,8 % maailman kokonaispäästöistä hiilidioksidiekvivalenteina mitattuna (CO<sub>2e</sub>). Taulukon tiedot ovat peräisin kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n julkaisemasta kasvihuonekaasupäästöjä käsittelevästä tutkimuksesta. Tutkimuksessa esiteltiin eri skenaarioita merenkulun tulevaisuuden kehityksestä. Tulosten mukaan meriteitse kulkevan rahdin määrä tulee kasvamaan 50–250 % vuoteen 2050 mennessä. Suurimman kasvun skenaarion toteutuminen tarkoittaisi merenkulun osuuden maailman kokonaispäästöistä kasvavan jopa kymmeneen prosenttiin. Kaikki paitsi yksi

skenaarioista ennustivat päästöjen olevan suuremmat kuin vuonna 2012. Matalimmat päästöt saivat skenaariot, joissa käytettiin uusiutuvia energianlähteitä vaihtoehtoisina polttoaineina. (IMO 2015, 145).

Taulukko 1. Päästöt 2007–2012 (miljoonaa tonnia) (IMO 2015, 32)

Vuosi	Kokonais CO <sub>2</sub> e	Merenkulun osuus CO <sub>2</sub> e	Merenkulun osuus %
2007	34 881	1 121	3,2
2008	35 677	1 157	3,2
2009	35 519	998	2,8
2010	37 085	935	2,5
2011	38 196	1 045	2,7
2012	39 113	961	2,5
<b>Keskiarvo</b>	<b>36 745</b>	<b>1 036</b>	<b>2,8</b>

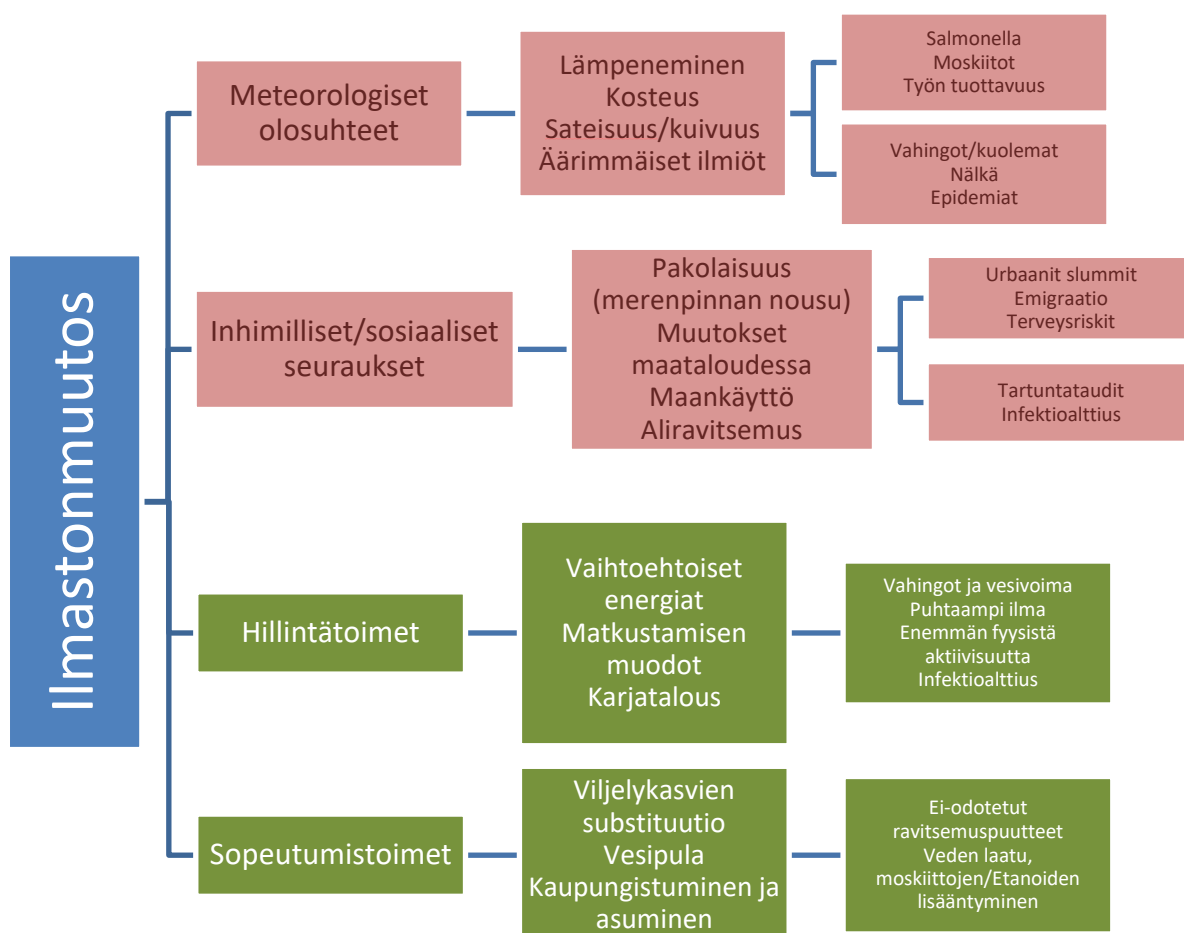
### 3.2 Päästövaikutukset

Alailmakehä on lämmennyt 1800-luvun lopusta noin 0,8 astetta. Vaikka ilmastovaihtelut eivät ole mikään uusi ja yllättävä ilmiö ovat tutkijat silti tulleet siihen lopputulokseen, että nykypäivän ilmastonlämpeneminen johtuu pääasiallisesti fossiilisten polttoaineiden poltosta. (Keskitalo 2011, 8.) Ilmastonmuutoksella on merkittäviä vaikutuksia luonnon monimuotoisuudelle, ihmisten hyvinvointiin ja elinympäristölle. Maapallon lämpöä säätelee maapallolle tuleva ja siitä poistuva säteily ja lämpömäärä, eli säteilypakote. Kuitenkin vain pieni määrä lämmöstä on varastoituneena ilmakehään sillä pääosa lämpömäärästä on sitoutuneena valtameriin. Merissä muutokset havaitaan kuitenkin melko hitaasti ja siksi on päädytty seuraamaan ilmakehän herkempiä muutoksia kasvihuonekaasupäästöiden vaikutuksesta. Ihmisen toiminnasta johtuvat kasvihuonekaasupäästöt imevät lämpösäteilyä, jolloin lämpöä ei pääse karkaamaan takaisin avaruuteen. Näitä kasvihuonekaasuja ovat muiden muassa vesihöyry, metaani, dityppioksidi ja hiilidioksidi, joista



viimeinen on myös meriliikenteen suurin kasvihuonekaasu. (Virtanen 2011, 21–22; IMO 2015, 32.)

Tähän mennessä aiheutunut aiemmin mainittu 0,7–0,8 asteen lämpeneminen on jo aiheuttanut suuria vaikutuksia ihmiselle ja ympäristölle. Lämpenemisestä johtuneet äärimmäiset sääilmiöt, kuten lämpöaallot, tulvat ja hirmumyrskyt, ovat aiheuttaneet kuolemia ja elinympäristöjen tuhoutumista. Esimerkiksi meriveden pintalämpötilan asteen nousu saattaa nostaa tuulen nopeutta maanpinnalla jopa 5 m/s suuremmaksi. Hiilidioksidipitoisuuden kasvu ilmakehässä lisää merien happamuutta ja näin horjuttaa merellisten ekosysteemien tasapainoa. (Virtanen 2011, 22-25.)



Kuvio 1. Ilmastonmuutoksen vaikutukset sekä keinoja sen hillintään (Virtanen 2011, 25)

### 3.3 Päästörajoitukset

Meriliikennettä säätelevät niin globaalit kuin aluekohtaiset päästörajoitukset. IMO:n päästörajoitusstrategia koostuu ilmakehän päästöjen pienentämisestä ja alusten energiatehokkuuden parantamisesta.

MARPOL-yleissopimuksen liite VI määrää merenkulun typen oksidi-, rikkioksidi- sekä pienhiukkaspäästöistä. Rikkioksidi (SO<sub>x</sub>) päästöjä on rajoitettu käytettävän polttoaineen rikkipitoisuutta alentamalla. Raja on nykyään maailmanlaajuisesti 3,50 % ja 1.1.2020 alkaen raja lasketaan 0,50 prosenttiyksikköön, tähän sisältyvät myös pienhiukkaset. (IMO 2019a.)

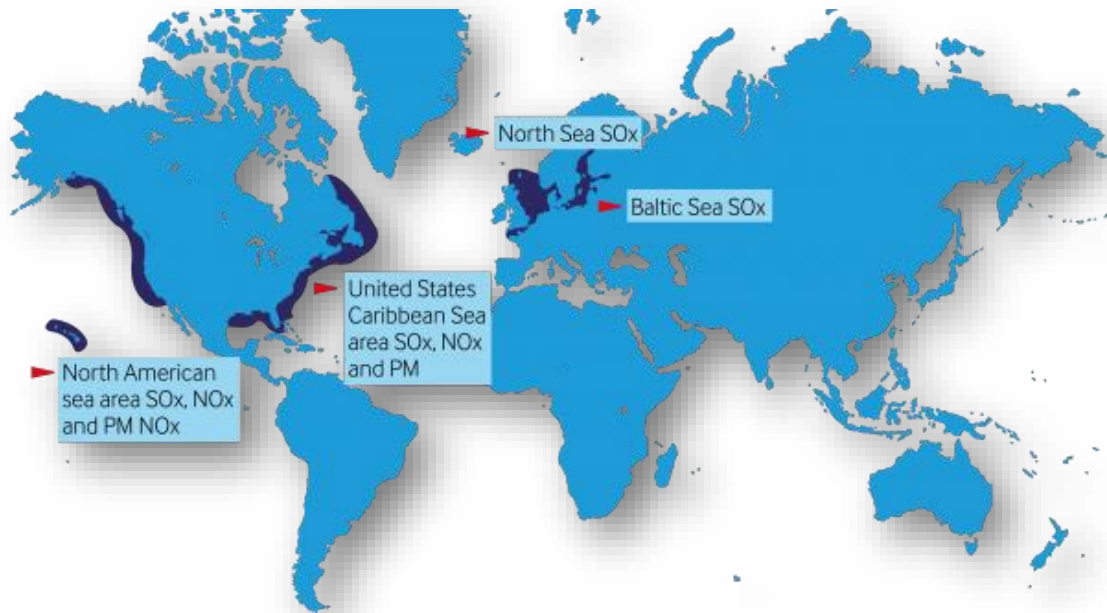
Typen oksideja (NO<sub>x</sub>) pystytään rajoittamaan teknisin ratkaisuin. Teknisiä määräyksiä säätelee NO<sub>x</sub> Technical Code 2008 -koodi. Alusten polttomoottorit luokitellaan eri tasoille (tier) aluksen rakentamisajankohdan perusteella. Tasovaatimukset näkyvät taulukosta 2 (IMO 2019b.)

Taulukko 2. NO<sub>x</sub>-rajoitusten tasot (IMO 2019b)

Taso	Rakennus pvm
I	1.1.2000
II	1.1.2011
III	1.1.2016

Päästörajat lasketaan testiolosuhteissa koodin määrittämällä tavalla. Laskukaava määräytyy koneiston tyypin mukaan. Tason noustessa tai päästömääräyksen kiristyessä huolehditaan ettei uusi määräys ylitä vanhaa tasoa yli 50 prosentilla. (NO<sub>x</sub> Technical Code 2008, 20.)

Alueellisia päästörajoituksia on myös laadittu. Näitä kutsutaan ECA:oisiksi (Emission Control Area). Alueilla on tiukemmat päästörajoitteet: SO<sub>x</sub> < 0,50 % ja NO<sub>x</sub> päästöt tasojen mukaan. (IMO 2019a) Nykyiset alueet ovat USA:n ja Kanadan rannikot sekä Karibianmeri ja Havaji, Itämeri ja Pohjanmeri (IMO 2019e).Kuvassa 1 esitetty merialueet graafisesti.



Kuva 1. Emission Control Areas (Hall 2015)

Uudisrakenteiden energiatehokkuutta ja näin myös päästöjä säätelee alusten energiatehokkuuden parantamiseen vaikuttava EEDI (Energy Efficiency Design Index). EEDI astui voimaan 1.1.2013 ja sen ensimmäisen vaiheen tavoite on leikata hiilidioksidipäästöjä 10 % joka viides vuosi. (IMO 2019c.)

Samana vuonna voimaan astui myös laivan energiatehokkuuden johtamista käsittelevä SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan), joka keskittyy aluksen käyttöön. SEEMP antaa varustamoille työkalun parantaa alusten polttoainetehokkuutta ja näin vähentää päästöjä sekä polttoainekustannuksia. (IMO 2019c.)

SEEMP:iin liittyen vuonna 2016 asetettiin määräys alusten polttoaineenkulutuksen seurannasta. Asetuksessa yli 5 000 GT:n alusten pitää pitää kirjaa jokaisesta käytetystä polttoainetyypistä. Kerätty data raportoidaan lippuvaltioviranomaiselle joka vuoden lopussa. Lippuvaltio luovuttaa tiedot IMO:lle, joka laatii vuosittaisen raportin kulutuksista. (IMO 2019d.)

## 4 VAIHTOEHTOJA

### 4.1 Bioenergia

Uusiutuvien eloperäistä alkuperää olevien biomassojen käyttö energiantuotannossa lasketaan bioenergiaksi. Tähän luetaan niin biomassojen suora polttaminen kuin myös kasvimassoista tehtyjen jalosteiden poltto. Kasvimassoihin kuuluu muun muassa puu, peltobiomassat ja lietteet. Biomassojen sekä sen jalosteiden poltosta ei lasketa tulevan kasvihuonekaasupäästöjä, koska siitä syntyvien päästöjen katsotaan sitoutuvan takaisin kasvustoon. Täysin päästötöntä tuotanto ei kuitenkaan ole, sillä biomassojen keräily ja kuljetus sekä jalostus tuottavat päästöjä. (Satka & Paatero 2011, 228–230.)

Bioenergian tuotanto ja käyttö on tällähetkellä vain kehittyneiden maiden käsissä. Biomassoista tuotetaan lähinnä biopolttoaineita liikenteelle kuten biodieseliä ja -etanolia sekä biokaasua. Myös biomassan käyttö lämmitykseen ja energiantuotantoon on lisääntymässä. Lämpöä ja sähköä voidaan kuitenkin tuottaa monilla muillakin uusiutuvilla vaihtoehdoilla, joten bioenergian tutkimustyö on lähtökohtaisesti keskittynyt polttoaineiden ja kemianteollisuuden tuotteiden kehittämiseen ja valmistamiseen. (Cherubini & Strømman 2011, 3–4)

#### 4.1.1 Biodiesel

1900-luvun alussa Rudolf Diesel kehitti moottorin, joka käytti polttoaineenaan kasviöljyä. Siihen aikaan kuitenkin kasviöljyt olivat huomattavasti kalliimpia kuin polttoöljy ja siksi hänen ideansa jäi unohduksiin lähes vuosisadaksi. Tänäpäivänä kasviöljyt eivät edelleenkään ole käytössä polttoaineena vaan raaka-aineena biodieselille. (Marchitti 2010, 6–13.)

Biodiesel on yksi eniten tutkituista uusiutuvista energiamuodoista. Biodieseliä valmistetaan biomassasta, jota tuotetaan esimerkiksi rypsiä, palmuista sekä

soijapavuista. Kun nämä kasvit kasvavat, ne absorboivat ilmakehän hiilidioksidia ja sitovat sen kasvustoihinsa. Kun kasviperäistä biodieseliä käytetään polttomotorissa, kasviin kasvuvaiheessa sitoutunut hiilidioksidi palaa ilmakehään. Biodieselin katsotaan näin olevan hiilineutraali. Raakaöljyperäiseen dieseliin verrattuna biodiesel on parempaa niin biohajoavuuden, leimahduspisteen kuin rikkipitoisuudenkin osalta. Muut uusiutuvat energiat, kuten esimerkiksi aurinkoenergia ja tuulivoima, tuottavat energiaa sähkönä tai lämpönä. Tästä syystä biodiesel on myös muihin uusiutuviin energianlähteisiin verrattaessa parempi vaihtoehto nykyiseen moottorikantaan. Maailman kokonaisenergiankulutuksesta 40 % tuotetaan nestemäisillä polttoaineilla. Biodiesel sopii tavalliseen dieselmotoriin sellaisenaan ilman rakenteellisia muutoksia. Biodiesel ympäristöystävällisenä ja uusiutuvana vaihtoehtona on iso kandidaatti fossiilisten polttoaineiden korvaajaksi tulevaisuudessa. (Tan & Lee 2011, 340–341.)

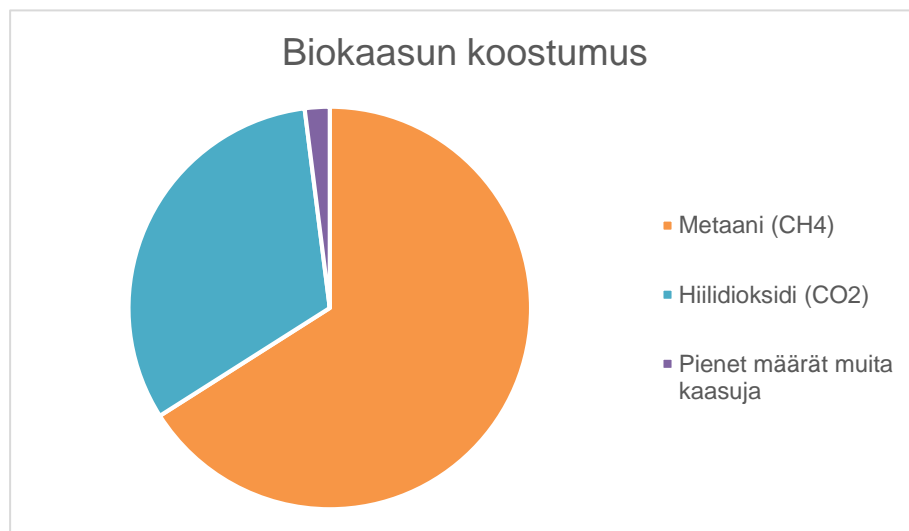
Taulukko 3. Dieselin ja biodieselin ominaisuuksia (Islam, Taufiq-Yap, Teo & Chan 2015, 2)

	Diesel	Biodiesel
Koostumus	Hiilivety	FAME
Tiheys kg/l	0,85	0,88
Leimahduspiste °C	60-80	100-170
Samepiste °C	5-15	3-12
Vesi %	0,05	0,05
Hiili %	87	77
Vety %	13	12
Happi %	0	11
Rikki %	0,05	0,05
Setaani numero	40-55	48-60

#### 4.1.2 Biokaasu

Biokaasu on uusiutuva ja hiilidioksidivapaa energiamuoto, jota tuotetaan muuttamalla biohajoavia jätteitä bakteerien ruoansulatuskaasuiksi. Jätteet ”sulatetaan” (digest) anaerobisesti mikro-organismien avulla tarkoitukseen soveltuvissa reaktoreissa. (Kayhanian & Tchobanoglous 2007, 25-2.) Biokaasun ensimmäiset teollisen mittakaavan tuotannot käynnistyivät 1970-luvun öljykriisin myötä, mutta kiinnostus tuotantoon hiipui pian kriisin päättymisen jälkeen. Vasta 1990-luvun alussa kiinnostus biokaasuun syttyi uudelleen. Prosessissa voidaan hyödyntää lähes kaikkea orgaanista materiaalia. Moderneissa reaktoreissa käytetään eläinten lannan, jätteiden ja energiakasvien, kuten maissin sekoituksia. (Zwart & Langeveld 2010, 180–182).

Biokaasu koostuu pääosin metaanista ( $\text{CH}_4$ , 50–75 %) ja hiilidioksidista ( $\text{CO}_2$ , 25–50 %) sekä pienistä määristä muita kaasuja kuten vetysulfideja ( $\text{H}_2\text{S}$ , 0,01–1,5 %), vetyä ( $\text{H}_2$ ,  $0\text{--}3,5 \cdot 10^{-6}$  %) ja typpeä ( $\text{N}_2$ ,  $0\text{--}8 \cdot 10^{-6}$  %). (Kayhanian & Tchobanoglous 2007, 25-25.)



Kuvio 2. Biokaasun koostumus (Kayhanian & Tchobanoglous 2007, 25-25)

Polttomoottorikäyttöön soveltuvaa biokaasu ei kuitenkaan sellaisenaan ole sen sisältämien epäpuhtauksien ja suuren hiilidioksidipitoisuuden takia. Kaasua käsitellään jalostamalla ja puhdistamalla se lähes 97 prosenttiseksi metaaniksi. Puhtaan metaanin lämpöarvo on  $38 \text{ MJ}/\text{m}^3$ , mikä tekee siitä hyvän energianlähteen. Käsittelyn jälkeen kaasu nesteytetään miinus 160 celsiusasteessa kuljetusta varten. Nesteytetty biokaasu on yhteensopivaa olemassaolevan LNG infrastruktuurin kanssa niin kuljetuksen, varastoinnin kuin käytönkin osalta. (Gasum www-sivut 2019.)

Puhdistettuna biokaasu soveltuu hyvin polttomoottoreihin, vain voiteluöljytyyppi täytyy olla biokaasulle soveltuva. Polttomoottorikäytössä saavutettava nimellisteho on yleensä 5–15 % maakaasukäyttöä matalampi. Biokaasua voi polttaa myös kaasuturbiinissa. Kuten polttomoottorissa, biokaasun käyttö vaatii tarkempaa turbiinin tilan seuranta, sillä se saattaa kulua odotettua nopeammin. Ennen turbiiniin syöttämistä on tärkeää poistaa höyrystynyt vesi biokaasuvirrasta. (Kayhanian & Tchobanoglous 2007, 25-27.)

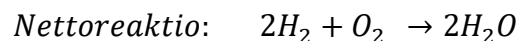
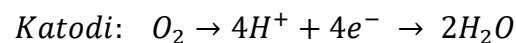
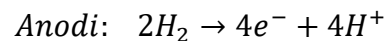
## 4.2 Polttokenno

Isler (2007, 8-23) yksinkertaistaa polttokennon hyvin samanlaiseksi kuin akku. Kun akku ladataan sähköllä, polttokenno ladataan tai "täytetään" elektrolyytillä, kuten vedyllä. Polttokenno on puhdas, hiljainen ja lähes kolme kertaa energiatehokkaampi kuin paras polttomoottori. Polttokennoista voidaan tehdä lähes kaiken kokoisia, joten sitä voi soveltaa voimanlähteenä lähes mihin vain. Polttokennon poltto- tai täyttöaineita on useita, mutta juuri vedyllä täytettävä protoninvaihtopolttokenno, eli PEMFC-polttokenno (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), on lupaavin vaihtoehto liikkuviin rakenteisiin. (Isler 2007, 8-23.)

#### 4.2.1 PEMFC-polttokenno

PEMFC-polttokenno eli vetytolttokenno käyttää polttoaineenaan vetyä. Kennon reaktiolämpötila on matalampi sekä energiatiheys korkeampi kuin useimpien muiden polttokennojen (Isler 2007, 8-23). Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, noin 75 % universumin massasta on vetyä. Pieni vetyatomi on yksinkertaisin ja kauiten tunnettu alkuaine ja ensimmäisenä syntyneenä aineena rakennuspalikka, josta kaikki muut alkuaineet lopulta muodostuivat. Vety on hyvin reaktiivista ja muodostaa herkästi yhdisteitä muiden alkuaineiden kanssa. Vedyn erottaminen esimerkiksi vedestä vaatii hyvin paljon energiaa. Vesi on hyvin stabiili yhdiste, jossa vety ja happi ovat lujasti sitoutuneet toisiinsa. Koska puhdasta vetyä ei luonnosta löydy, on sitä ihmisen tuotettava teollisesti. Yksi menetelmä on syöttää sähkövirtaa veden läpi. Sähköenergia erottaa vetyatomit hapesta ja vetyatomit muodostavat uusia sidoksia toistensa kanssa. Tätä prosessia kutsutaan elektrolyysiksi ja se on vanhin ja edelleen yleisin vedyn tuotantomenetelmä. Elektrolyysi on myös käännettävä prosessi: kun vetyä ja happea yhdistetään tietyissä olosuhteissa syntyy sähköenergiaa, vettä ja lämpöä. Toisin sanoen polttokenno on käänteinen elektrolyysi. (Roberts 2006, 80–85.)

Kun polttokennoon syötetään puhdasta vetyä (H<sub>2</sub>) sekä happea (O<sub>2</sub>) syntyy seuraava kemiallinen reaktio:



Kennossa vetyatomi ionisoituu ja elektronit (e<sup>-</sup>) johdetaan ulkoiseen sähköverkkoon. Verkon miinusnapa liitetään kennon katodiin, jossa negatiivisesti varautuneet elektronit yhtyvät positiivisesti varautuneisiin vety ioneihin (H<sup>+</sup>) sekä ilman happeen (O<sub>2</sub>) muodostaen vettä (H<sub>2</sub>O). (Isler, 2007, 8-23.)



Suuri haaste PEMFC-polttokennon yleistymiselle on vedyn varastointi ja kuljetus. Vety nesteytyy -253 asteen lämpötilassa sekä nesteyttäminen että kylmän nesteen varastointi kuluttavat energiaa melkein kolmasosan vedyn sisältämästä energiasta. Normaalipaineessa vety vie 3000 kertaisen tilavuuden kuin saman energiamäärän sisältämä bensiini. Kaasumaisena vety on hyvin räjähdysherkkää sekä kevyt kaasu karkaa herkästi taivaan tuuliin ja tihkuu jopa terässäiliön läpi. Vety on siis pakko puristaa kokoon eli nesteyttää. (Keskitalo 2011, 110–112.)

Yhdysvaltalainen Ballard Power Systems (Ballard 2018) on tuotteistanut ja kehittänyt erityisesti PEMFC-polttokennoa jo useamman vuosikymmenen. Ballard on yhteistyössä saksalaisen ABB:n kanssa kehittänyt jopa 1 MW tehoisen polttokennojärjestelmän asennettavaksi laivaan. Järjestelmä koostuu useista 100–200 kW:n suuruisesta yhteen kytketyistä kennoista. (Ballard 2018.) Vedyn tuotanto ja varastointi, sekä järjestelmän korkea hinta ovat kuitenkin vielä liian suuria esteitä halvan öljyn rinnalla (Keskitalo 2011, 193).

#### 4.2.2 MCFC-polttokenno

MCFC-polttokenno (Molten-Carbonate Fuel Cell) eli sulakarbonaatti-polttokennoa kutsutaan usein myös toisen sukupolven polttokennoksi. MCFC:n tuotekehitys tähtää siihen, että kennostossa pystytään hyödyntämään hiilipohjaisia polttoaineita tai maakaasua (biokaasu). Reaktio kennossa tapahtuu melko korkeassa lämpötilassa, noin 600–700 °C:ssa. Korkea reaktiolämpö tuottaa eri prosesseissa hyödynnettävissä olevaa hukkalämpöä. Käyttölämpötilansa ansiosta sulakarbonaattikennon jännitehäviöt ovat pienemmät kuin esimerkiksi PEMFC-kennossa, sillä se ei tarvitse erillistä vedyntuotanto ja -erotuslaitosta vaan vety ”irtoaa” polttoaineesta korkean lämpötilan avulla. Useat tutkimukset ovat osoittaneet MCFC-kennon erinomaisen tehokkuuden juuri maakaasua ja metanolia polttoaineena käytettäessä. (Xianguo 2007, 28-34–28-40.)

Käytössä kenno kuluu ja sen energiatehokkuus pienenee. Katodi koostuu nikkelioksidista (NiO), joka hitaasti liukenee elektrolyyttiin johtaen kennon oikosulkuun. Elektrolyytin vähentyessä kennon resistanssi kasvaa, mikä on suurin yksittäinen syy pitkän aikavälin tehonalenemalle. Sulakarbonaattipolttokennon normaali käyttöikä jää selvästi alle 25 000 tunnin. (Xianguo 2007, 28-40–28-41.)

#### 4.2.3 SOFC-polttokenno

SOFC-polttokenno eli kiinteäoksidipolttokenno (Solid-Oxide Fuel Cell) on täysin kiinteä polttokennoratkaisu elektrolyytti mukaanlukien. Kuten MCFC, kiinteäoksidipolttokenno toimii hyvin korkealla reaktiolämmöllä, noin 1000 °C. Korkea lämpötila mahdollistaa kennoon riittävän ionisen ja sähköisen johtavuuden, mutta myös asettaa materiaaleille korkeammat vaatimukset. Täysin kiinteä rakenne tekee SOFC-kennosta rakenteeltaan, toiminnaltaan ja suunnittelun kannalta yksinkertaisen polttokennon. Polttoaineina voidaan käyttää kaasuja kuten vetyä ja hiilivetyjä. Hiilimonoksidi (CO) eli häikä ei aiheuta SOFC-kennossa ongelmia toisin kuin matalamman reaktiolämmön omaavissa kennoissa, missä se pilaa reaktion. Häkää voidaan käyttää jopa polttoaineena. (Xianguo 2007, 28-41–28-43.)

#### 4.3 Aurinkoenergia

Aurinkokennon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa auringon valo muunnetaan suoraan sähköksi. Valosähköiset laitteet eivät sisällä liikkuvia osia, jonka vuoksi ne ovat yksinkertaisia, kestäviä ja lähes huoltovapaita. Laitteiden suurin etu on niiden kyky toimia itsenäisinä virtalähteinä laajan teholuokan laitteille kuten esimerkiksi taskulaskimet, linkkitornit ja satelliitit. Tehontuotto jakautuu mikrowateista megawatteihin. (Messenger ym. 2007, 23-1.)

Valosähköisen ilmiön havaitsi ensimmäisenä ranskalainen tutkija Alexandre Edmond Becquerel vuonna 1839 suorittaessaan elektro-kemiallisia kokeita.

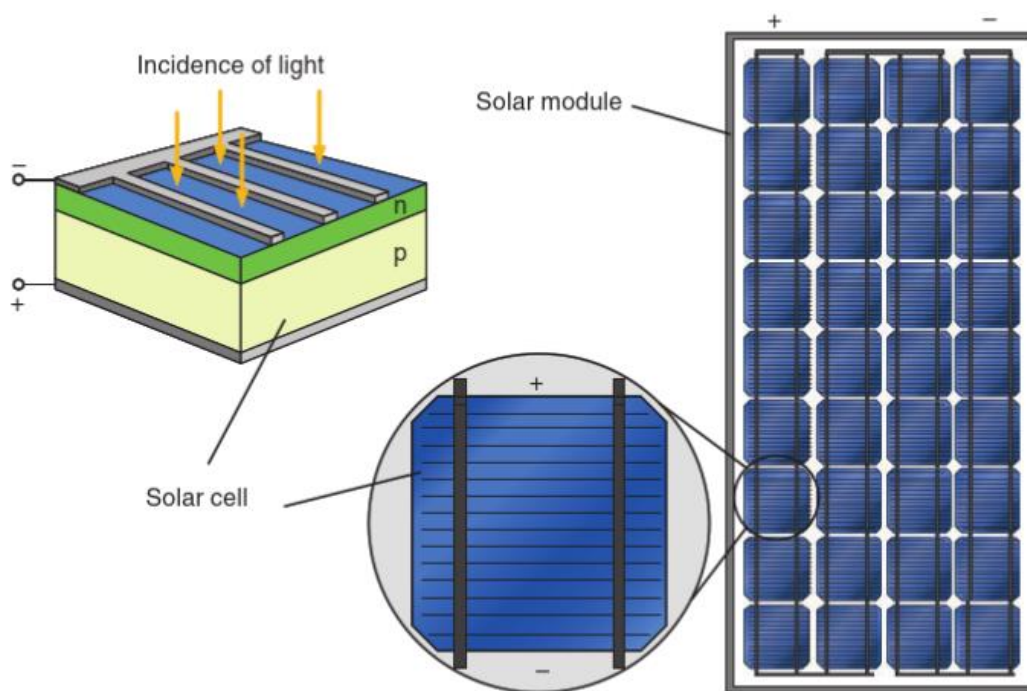
Kokeessaan Becquerel laittoi kaksi platinalla pinnoitettua elektroodia elektrolyyttiin ja mittasi elektrodien välillä kulkevan virran. Hän havaitsi virran voimakkuuden muuttuvan kun elektrolyytti altistettiin valolle. (Mertens 2014, 16.) Läpi 1800-luvun tutkijat kokeellisesti todistivat valosähköisen ilmiön olemassaolon. Tutkijoita kuitenkin hämmensi valosähköisen ilmiön piirteet, joita ei klassisen fysiikan teorioilla pystynyt selittämään. Vasta maaliskuussa 1905 muuan fyysikko Albert Einstein laajensi kvanttikäsitteen koskemaan myös vapaata sähkömagneettista säteilyä. Einsteinin mallissa kvantin energia määräsi fotoelektronin suurimman liike-energian. Näin syntyi valon kvanttiteoreettinen malli, josta Einstein sai fysiikan Nobelin vuonna 1921. (Inkinen, Manninen & Tuomi 2002, 456–458.)

Valosähköinen ilmiö ilmenee puolijohteilla, pääsääntöisesti piillä. Piikiekon runko-osa on p-tyyppiä ja sen päälle on prosessoitu ohut mikrometrien paksuinen n-tyypin kerros. Pn-liitos toimii tasajännitelähteenä, kun kiekoon kohdistetaan sähkömagneettista säteilyä, kuten auringon valoa. Fotonien energia on niin suuri, että ne pääsevät n-pintakerroksen läpi pn-liitokseen muodostamaan elektroni-aukkopareja. Avoimen pn-liitoksen yli vaikuttaa sähkökenttä ja diffuusiojännitteen (p- ja n-tyypin välinen potentiaaliero) suuruinen jännite. Kennon koosta riippumaton diffuusiojännite piillä on noin 0,6 voltia ja se on suurimmillaan piirin ollessa avoin. Kennosta saatu tasavirta on riippuvainen kennon pinta-alasta ja siihen osuvan valon tehontiheydestä. Auringon säteilyn tehontiheys maan pinnalla on noin 1 kW/m<sup>2</sup>. (Inkinen, Manninen & Tuomi 2002, 571-574.)

#### 4.3.1 Paneelin rakenne

Aurinkokennon raaka-aine on joko yksi- tai monikiteinen pii. Taipuisia paneeleita voidaan valmistaa amorfisesta piistä. Amorfisessa aineessa atomit ovat täydellisessä epäjärjestyksessä. Amorfinen materiaali on hyvin ohut joten siitä voidaan valmistaa erittäin ohuita ja taipuisia paneeleita. Ohutkalvotekniikalla valmistetun paneelin tehollinen pinta-ala on pienempi

kuin kiteisen, mutta varjonsietokyky on parempi. Yksikiteinen pii valmistetaan puhdistamalla ja jalostamalla luonnossa esiintyvää piitä tankomuotoon. Tankoa kasvatetaan ja siitä höylätään 0,35 – 0,45 mm paksuisia kennoja. Yksikiteinen kenno on kallis, sillä sen valmistaminen vaatii huolellisuutta. Monikiteiset paneelit valmistetaan valamalla, jolloin niihin muodostuu selvästi havaittava monikiteisyys. Kennot ovat halvempia, sillä valmistus ei ole niin tarkkuutta vaativaa kuin yksikiteisessä. Yksikiteisessä paneelissa on parempi hyötysuhde kuin monikiteisessä ja siksi yksikiteinen on pitkään ollut yleisin paneelityyppi. (Erat ym. 2008, 124-125.)



Kuva 2. Aurinkokennon ja -paneelin rakenne (Mertens 2014, 13)

Yksittäisiä kennoja voidaan kytkeä sarjaan ja rinnan, aivan kuin tavallisia jännitelähteitä, kuten paristoja. Kuvassa 2 on esitetty kennon yleisrakenne sekä 36 yksittäisen kennon sarjaankytketty paneeli. (Mertens 2014, 13). Näin kytketyn kennon kokonaisjännite voidaan laskea kertomalla diffuusiojännite sarjaan kytkettyjen kennojen lukumäärällä.

$$U_{kok} = U_{dif} \times n_k$$

$$U_{kok} = 0,6 V \times 36$$

$$U_{kok} = 21,6 V$$

#### 4.4 Energiatehokkuuden parantaminen

Energiatehokkuus kuuluu IMO:n päästöleikkausstrategiaan. EEDI-määräysten tavoite on vähintään 30 % energiatehokkaammat alukset vuoteen 2025 mennessä verrattuna vuonna 2014 rakennettuun aluskantaan. Suurin painoarvo on polttoaineiden ja -tekniikoiden kehittämisessä sekä vesirajan alapuolisten rakenteiden hydrodynamiikan parantamisessa. (IMO 2018,4–15.) Myös aluksen käytön aikainen energiatehokkuuden valvonta on keino vastata energiatehokkuuden parantamiseen, ja sitä säätelevät SEEMP määräykset. Määräykset painottavat aluksen käsittelyn merkitystä, kuten esimerkiksi reittisuunnitelmien, aluksen trimmin sekä autopilotin optimoiminen energiatehokkuuteen tähtääväksi. (IMO 2016, 7–10.)

##### 4.4.1 Nopeuden vähentäminen

Aluksen kulkunopeuden alentaminen on yksi keino vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Kun kulkunopeus vähenee 10 % laskee tehontarve 27 %. Tätä verrannollisuutta ei voi aivan suoraan hyödyntää, sillä nopeuden alentuessa alus tarvitsee enemmän aikaa kulkeakseen saman matkan. Niinpä tehontarpeen alenema voidaan arvioida olevan noin 19 % kun nopeus laskee 10 %. (Faber, Huigen & Nelissen 2017, 5.)

Aluksen turvallinen kulku täytyy kuitenkin pitää mielessä. Aluksella tulee olla tietty miniminopeus, jotta se kykenee ylläpitämään kurssinsa. Tämä nopeus tulee pystyä ylläpitämään myös vaativissa olosuhteissa. Mahdollisia nopeudenalennuksia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon myös moottorin energiatehokkuus, joka yleensä kärsii osittaisella kuormalla ajaessa. Osakuormalla ajaessa voitaisiin esimerkiksi osaa moottorin sylintereistä

lepuuttaa, eli katkaista kyseisen sylinterin polttoaineensyöttö. Toki myös uusien moottoreiden sähköiset ohjaukset kasvattavat moottorin optimointialuetta, jota voidaan käyttää hyödyksi parasta kulkunopeutta valittaessa. (Faber, Huigen & Nelissen 2017, 6–7.)

#### 4.4.2 Pohjakasvillisuus ja -eliöstö

Likaantunut pohja lisää aluksen kulkuvastusta ja näin myös polttoaineenkulutusta jopa 85 %. Pohjan kasvusto on myös ongelmallinen vieraslajien leviämisen kannalta. Eliöt voivat matkustaa pitkiäkin matkoja pohjaan kiinnittyneinä. Pohjan asianmukainen käsittely ja hoito tulee aina halvemmaksi kuin hoitamatta jätetyllä operointi. (Hydrex 2011. 1–14.)

Telakoinnit tulisi suorittaa aluksen suorituskyvyn seurannan havaintojen mukaan. Mikäli on havaittavissa energiankulutuksen kasvua, tulisi pohja putsata joko telakassa tai satamassa. Myös propulsiolaitteiden tilaa tulee seurata säännöllisesti. Potkurin puhdistus ja kiillotus tai jopa pintakäsittely on keino energiatehokkuuden parantamiseksi. Vedenalaisten rakenteiden pinnoitus uusilla tekniikoilla parantaa tehokkuutta. Mitä sileämpi runko, sitä parempi polttoainetalous. (IMO 2016, 9–10.)

## 5 KÄYTÄNNÖN ESIMERKKEJÄ

### 5.1 VG EcoCoaster

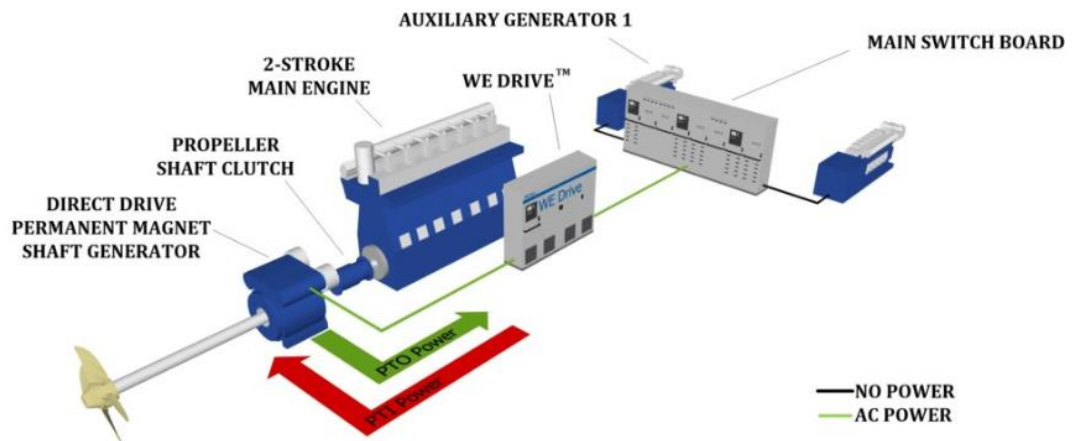
Suomalainen yhtiö Meriaura Group yhdessä Foreship Ltd:n ja Aker Arctic Technology Inc:n kanssa on kehittänyt biopolttoainepohjaisen uudenlaisen laivakonseptin VG EcoCoasterin. Alukset pystyvät käyttämään polttoaineenaan kasvirasvoista ja kalanperkuujätteistä valmistettua EcoFuelia. Näin EcoCoaster kykenee operoimaan lähes puolet pienemmällä polttoaineenkulutuksella, kuin vastaava perinteinen kuivarahtialus. VG

EcoCoasterit täyttävät kaikki tämän hetkiset sekä lähivuosina voimaan tulevat päästömääräykset niin hiilidioksidin kuin typpi- ja rikkipäästöjenkin osalta. Meriaura Groupin laivastoon on kuulunut syksystä 2016 lähtien kaksi EcoCoasteria: M/V Eeva VG ja M/V Minerva VG. Molemmat alukset ovat 5 000 DWT:n kuivarahtialuksia. (Meriaura www-sivut 2019.)

EcoCoastereiden käyttämä EcoFuel valmistetaan yhtiön omassa tuotantolaitoksessa Uudessakaupungissa. Fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna EcoFuelin kasviuonekaasupäästövaikutus on 60–97 % pienempi. Biopolttoaineen raaka-aineet ovat sata prosenttisesti jäte- ja kierrätyspohjaisia. Kierrätystaustan ansiosta VG EcoFuel on kestävä vaihtoehto korvaamaan kasviöljyt biopolttoainetuotannossa. Valmistusprosessissa hyödynnetään muun muassa elintarviketeollisuuden sivuvirtoja sekä jo kertaalleen käytettyjä kasviperäisiä öljyjä. (VG EcoFuel www-sivut 2019.)

## 5.2 M/T Tern Sea

Ruotsalaisen Terntank Rederi -varustamon tuotetankkeri Tern Sea on aikarahdattuna suomalaisen NEOT (North European Oil Trade) -yhtiön palvelukseen. Marras-joulukuussa 2018 NEOT:ista tuli ensimmäinen suomalaisyhtiö, joka on käyttänyt nesteytettyä biokaasua (LBG) kaupallisissa merikuljetuksissa, kun Tern Sea bunkrasi Göteborgin satamassa. Tern Sea:hin bunkrattu LBG on tuotettu Lidköpingissä, lounais-Ruotsissa. Tern Sea on vuonna 2016 valmistunut 147 metriä pitkä 15 000 DWT:n kemikaalitankkeri, joka on suunniteltu LNG ja Dualfuel-käyttöön. (NEOT 2019; Terntank 2019).



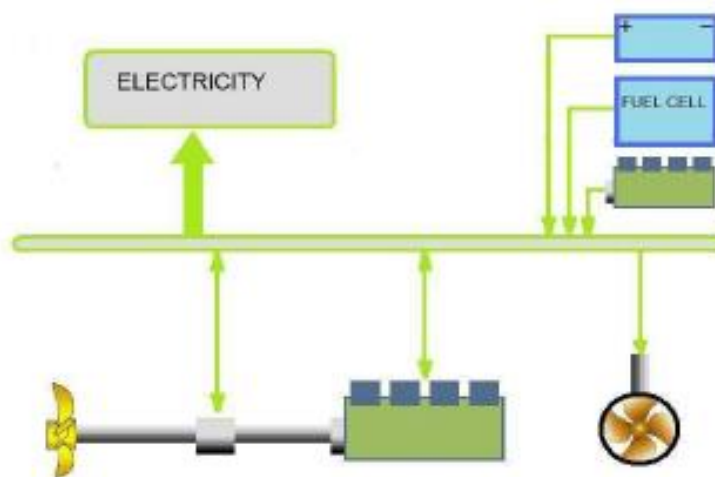
Kuva 3. M/T Tern Sea voimalinja (WeTech 2019)

Kuvassa 3 näkyy Tern Sean voimalinjan yleisjärjestelyt. Energiatehokkaan Wärtsilä 5RT-flex 50 DF -pääkoneen jälkeen on asennettu kestmagneetti akseligeneraattori. Akseligeneraattori mahdollistaa propulsioon tuottamisen niinsanotulla kombinaattori-toiminnolla. Tällöin pääkoneen kierroksia voidaan ajaa aina optimaalisella alueella parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi. (WeSolutions 2019; Terntank 2019.)

### 5.3 M/S Viking Lady

Viking Lady on norjalaisen Eidesvik Offshore -varustamon omistama offshore-tukialus, joka käytti ensimmäisenä maailmassa MCFC-polttokeinoja laivassa. Alus oli osa vuonna 2003 alkanutta FellowShip -projektia, jonka tarkoitus oli löytää uusia ratkaisuja pakokaasupäästöjen vähentämiseksi. Alukseen asennettiin polttokeinojärjestelmä ja 500 kWh akkukennossto. Järjestelmät mahdollistivat 18,5 tunnin operoinnin ilman pääkoneiden käyttöä. Akusto koostuu useista 6,5 kWh litium-polymeeri akuista. Akusto kykenee hetkellisesti jopa 5 MW tehonsyöttöön. (Vikinglady 2019; Gonzalo-Muñoz, As-Soler, Varro & Leo Teresa 2013, 63-72.)





Kuva 4. Viking Ladyn sähköjärjestelmä (Gonzalo-Muñoz ym. 2013)

Asennettujen järjestelmien ansiosta Viking Ladyn polttoaineenkulutus sekä hiilidioksidipäästöt laskivat 20–30% sekä typen oksidipäästöt pienenevät 180 tonnia (Corvus 2019).

#### 5.4 Tûranor PlanetSolar

Vuonna 2012 Tûranor PlanetSolar -alus matkusti maailman ympäri pelkällä aurinkopaneeleihin tuotetulla sähköllä. 31 metrisen katamaraanin suunnitteli uusiseelantilainen Craig Loomes. Aluksen sääkansi koostuu lähes täysin aurinkokennoista. Kennoja on yhteensä 38 000 kattaen noin 537 neliömetrin alan. Kennot on jaettu moduuleihin, joita aluksessa on yhteensä 825. Moduulit on kytketty 12 tonnia painavaan litium-ioni-akustoon, joka mahdollistaa kolmen päivän operoinnin ilman latausta. Paneeliston hyötysuhde on 22,6 %, mikä tarkoittaa 93,5 kW:n lataustehoa akustolle ihanne-olosuhteissa. Aluksen propulsiona toimii neljä kestmagneettimoottoria, jotka on yhdistetty kahteen potkuriin, siten että yhtä potkuriä pyörittää kaksi sähkömoottoria. Aluksen matkavauhti on 5 solmua, johon se pääsee 20 kW:n teholla. Huippunopeus on 9 solmua, joka saavutetaan 120 kW:n huipputeholla. Aluksen navigaatiojärjestelmään on integroitu ohjelma, joka kertoo optimaalisen reitin auringosta saatavan tehon maksimoimiseksi. (Planetsolar 2019.)



Kuva 5. Tûranor PlanetSolar (Tekniikan Maailma 2010)

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia ja selvittää keinoja tuottaa päästötöntä energiaa laivalla. Tähän tarkoitukseen soveltuisi oivallisesti vetykäyttöinen PEMFC-polttokenno. Polttokennon ehdoton etu on päästöttömyys ja suuri energiatiheys. ”Pakokaasuna” tulisi vain puhdasta vettä. Kennoston tuottamaa tasasähköä on helppo hyödyntää aluksen propulsioon ja muuhun sähköntarpeeseen. Polttokennoston jälkiasennus eli retrofittaus vanhaan alukseen voi tuottaa haasteita. Olemassa olevaan AC-verkkoon ei voi tasasähköä syöttää ilman vaihtosuuntausta, joka taas aiheuttaa häviöitä. Taajuusmuuttajakäyttöillä voitaisiin järjestää ainakin tahti- ja epätahtimoottoreiden käyttö, sillä taajuusmuuttajan tehonsyöttö ei aina tarvitse olla vaihtosähköä (Rekola 2019).

Nykytekniikalla vedyn tuotanto ja varastointi on vielä ylitsepääsemätön este polttokennon suuren mittakaavan läpimurrolle. Myös järjestelmän sovitus

vanhaan alukseen on mahdollisesti hyvin vaikeaa niin tilanpuutteen kuin sähköjärjestelmän sopivuuden kannalta. On hyvä huomata, että uudisrakenteissa yhä useammin päädytään DC-verkkoon mahdollisten tulevaisuuden laitteistojen takia (Rekola 2019). Polttokenno voitaisiin asentaa generaattoreiden rinnalle kuten Viking Ladyssä, ja vetyä voisi tuottaa aurinkoenergialla aluksella. Näin saataisiin polttokennolla tuotettua osa propulsio- tai omakulutuksesta ja siten leikattua polttoaineenkulutusta sekä päästöjä.

Aurinkosähkö ei todennäköisesti tule olemaan aluksen pääenergiamuoto. Paneelien huono hyötysuhde ja suuri koko ovat esteenä käytölle. Tûranor PlanetSolar osoitti aurinkosähköllä operoinnin mahdolliseksi, vaikka teho jääkin riittämättömäksi kauppamerenkululle. Aurinkokennotekniikka kehittyi nopeasti ja erityisesti nanoteknologian myötä alkavat paneelien hyötysuhteet parantua huomattavasti. Kennojen kehityksen lisäksi akkuteknologiaan odotetaan sitä suurta läpimurtoa. Aurinko ei paista kellon ympäri ja siksi on tärkeää pystyä varastoimaan energiaa aluksen ympärivuorokautisen operoinnin takaamiseksi.

Biopolttoaineet voisivat olla varteenotettava vaihtoehto fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi. Biopolttoaineita voidaan pitää niin sanottuna ensimmäisenä askeleena päästöttömyyteen siirtyessä. Muun muassa IMO (2018, 9) listaa vähä-hiiliset ja nolla-hiiliset polttoaineet (esim. biopolttoaineet) yhdeksi lyhyen aikavälin ratkaisuksi merenkulun päästövähennyksille. Meriaura on aluksillaan osoittanut biopohjaisten polttoaineiden käytännön sovellettavuuden sekä kilpailukyvyn. Biopolttoaineiden esteenä on toistaiseksi kielteiset ennakkoluulot ja asenteet. Esimerkiksi Helsingin pormestari Jan Vapaavuori leimasi biomassat Helsingin energiantuotannossa ”kyseenalaisiksi” sekä ”logistiseksi ongelmaksi” (Salminen & Siironen 2019). Ei kivihiilen kuljetus Hanasaareen ole ollut ”logistinen ongelma” voimalan elinkaaren aikana. Vapaavuori luultavasti viittasi energiakasveja viljelemällä tuotettuun biomassaan, jolloin maankäyttö ja logistiikka ovat ratkaistavia ongelmia. Jos halutaan käyttää biomassaa ja minimoida hiilipäästöt on myös

varmistuttava, että vastaava määrä uutta biomassaa kasvaa tilalle (Keskitalo 2011, 67).

Meriaura käytti tuotteessaan kierrätettäviä raaka-aineita sekä tuontantojätteitä ja näin varmisti polttoaineen ekologisuuden. Kierrättäminen on mitä luultavammin ratkaisu maankäyttöön ja logistiikkaan. Keskittämällä biokaasun tai -dieselin tuotantolaitokset ja käyttämällä olemassa olevaa jakeluverkostoa voisi siirtymä fossiilisista biopohjaisiin olla melko kivuton. Biopolttoaineiden läpimurto ei ole kaukana, mutta vaatii kattavan määrän työtä toteutuakseen. Biodiesel on koostumuksensa johdosta liuote, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia vanhemmissa polttomoottorijärjestelmissä. Vuosien aikana kertyneet epäpuhtaudet saattavat irrota biodieseliä käyttäessä ja tukkia mm. suodattimia ja suuttimia.

Nollapäästöinen alus tulee todennäköisesti olemaan monin eri tavoin eri energialähteitä hyödyntävä kokonaisuus. Aluksen kulkunopeus tulee olemaan hitaampi kuin mihin nykyään on totuttu. Rahdin kuljetuksen kilpailukyvyn ylläpitämiseksi alusten lastikapasiteetin tulisi kasvaa huomattavasti nykyisestä. Tämä tarkoittaa käytännössä ulkomittojen suurentamista, mikä taas lisää energiankulutusta. Lisätutkimusta tulisi suorittaa vielä tuulivoiman hyödyntämiseen sekä erityisesti akkutekniikkaan. Syksyllä 2020 julkaistaan IMO:n neljäs kasvihuonekaasupäästötutkimus, joka kattaa vuosien 2014–2019 tilastotiedot merenkulun päästöistä. Tutkimuksen johdosta tulee luultavasti EEDI ja SEEMP määräyksiin muutoksia tai lisäyksiä.

## LÄHTEET

Ballard Energy Solutions. 2018. Fuel cell solutions for zero emission ships. Viitattu 16.2.2019.

<https://info.ballard.com/fuel-cell-ships-presentation>

British Petroleum. 2019. Oil reserves. Viitattu 19.3.2019.

<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil.html#oil-reserves>

Cherubini, F. & Strømman, A. H. 2011. Principles of biorefining. Teoksessa Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S. C., Dussap, C.-G. & Gnansounou, E. (toim.) Biofuels – alternate feedstocks and conversion processes. Oxford: Elsevier, 3–24.

Corvus Energy www-sivut. 2019. Viking lady offshore supply vessel osv eidesvik offshore. Viitattu 21.3.2019. <https://corvusenergy.com/viking-lady-offshore-supply-vessel-osv-eidesvik-offshore/>

Erat, B., Erkkilä, E., Nyman, C., Peippo, K., Peltola, S. & Suokivi, H. 2008. Aurinko-opas. Porvoo: Aurinkoteknillinen yhdistys.

Faber, J., Huigen, T. & Nelissen, D. 2017. Regulating speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. Delft: CE Delft. Viitattu 14.1.2019.

<http://www.cleanshipping.org/download/Slow-steaming-CE-Delft-final.pdf>

Gasum www-sivut. 2019. Jätteen matka kaasuksi – näin Gasum tekee ekologista polttoainetta. Viitattu 18.3.2019.

<https://www.gasum.com/ajassa/tulevaisuuden-energia/2018/jatteen-matka-kaasuksi--nain-gasum-tekee-ekologista-polttoainetta/>

Gonzalo-Muñoz, A., As-Soler, J., Varro, E. & Leo Teresa, J. 2013. Marine practice guidelines for fuel cell applications. Teoksessa Journal of marine technology and environment. Constanta: Constanta Maritime University.

Hirsijärvi, S., Remes, P. & Sajavaara, P. 2015. Tutki ja kirjoita. Helsinki: Tammi.

Hydrex 2011. Clean Ship Hulls and Ports - Without Compromise. Viitattu 8.4.2019.

[http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOTEC\\_Clean\\_Ship\\_Hulls\\_and\\_Ports.pdf](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=ECOTEC_Clean_Ship_Hulls_and_Ports.pdf)

IMO. 2019a. Prevention of air pollution from ships. Viitattu 1.4.2019.

<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>

IMO. 2019b. Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>) – Regulation 13. Viitattu 1.4.2019.

[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)

IMO. 2019c. Energy efficiency measures. Viitattu 1.4.2019.  
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx>

IMO. 2019d. Data collection system for fuel oil consumption of ships. Viitattu 1.4.2019.  
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Data-Collection-System.aspx>

IMO. 2019e. Emission control areas (ECAs) designated under MARPOL annex VI. Viitattu 1.4.2019.  
<http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Emission-Control-Areas-%28ECAs%29-designated-under-regulation-13-of-MARPOL-Annex-VI-%28NOx-emission-control%29.aspx>

IMO. 2018. Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships.  
[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250\\_IMO%20submission\\_Talanoa%20Dialogue\\_April%202018.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf)

IMO. 2016. Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan. Viitattu 10.4.2019.  
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.282\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.282(70).pdf)

IMO. 2015. Third IMO GHG Study 2014. Lontoo: International Maritime Organization.

Inkinen, P., Manninen, R., & Tuohi, J. 2002. Momentti 2 insinöörifysiikka. Helsinki: Otava.

Isler, B. 2007. Transportation systems. Teoksessa Kreith, F. & Goswami, D.Y. (toim.) Handbook of energy efficiency and renewable energy. Boca Raton FL. Taylor & Francis Group, 8-1–8-24.

Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus opinnäytetyönä. Jyväskylä: JAMK.

Kayhanian, M., Tchobanoglous, G. & Brown, R.C. 2007. Biomass conversion processes for energy recovery. Teoksessa Kreith, F. & Goswami, D.Y. (toim.) Handbook of energy efficiency and renewable energy. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, 25-1–25-67.

Keskitalo, J. 2011. Ihmiskunnan energiakriisi. Helsinki: Gaudeamus.

Marchetti, J. M. 2010. Biodiesel production technologies. New York: Nova science publishers.  
[https://samk.finna.fi/Record/nelli26\\_samk.2670000000176372](https://samk.finna.fi/Record/nelli26_samk.2670000000176372)

MEPC. 2018. Initial imo strategy on reduction of GHG emissions from ships. Viitattu 31.3.2019.  
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.304\(72\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.304(72).pdf)

MeriAura www-sivut. 2019. Kestävä kehitys. Viitattu 2.4.2019.  
<https://meriAura.fi/kestava-kehitys>

Mertens, K. 2014. Photovoltaics fundamentals, technology and practice. Sussex: John Wiley & Sons.

Messenger, R., Goswami, D. Y., Upadhyaya, H. M., Razykov, T. M., Tiwari, A. N., Winston, R. & McConnell, R. 2007. Photovoltaics fundamentals, technology and application. Teoksessa Kreith, F. & Goswami, D.Y. (toim.) Handbook of energy efficiency and renewable energy. Boca Raton FL: Taylor & Francis Group, 23-1–23-63.

NEOT www-sivut. 2018. NEOT:sta ensimmäinen merikuljetuksissaan LBG:tä käyttänyt suomalaisyhtiö. Viitattu 8.4.2019. <https://www.neot.fi/neotsta-ensimmainen-merikuljetuksissaan-lbgta-kayttanyt-suomalaisyhtio/>

NO<sub>x</sub> Technical Code 2008. 2008. Amendments to the technical code on control of nitrogen oxides from marine diesel engines. Viitattu 1.4.2019. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Resolution%20MEPC.177\(58\)%20NOx%20Technical%20Code%202008.pdf](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Air%20pollution/Resolution%20MEPC.177(58)%20NOx%20Technical%20Code%202008.pdf)

OPEC. 2019. OPEC share of crude oil reserves, 2017. Viitattu 19.3.2019. [https://www.opec.org/opec\\_web/en/data\\_graphs/330.htm](https://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm)

Planet Solar www-sivut. 2019. Viitattu 8.4.2019.  
<https://www.planetsolar.swiss/en/world-premiere/boat/>

Rekola, J. 2019. Steerprop esittelyluento Satakunnan ammattikorkeakoulussa 4.4.2019.

Roberts, P. 2006. Kun öljy loppuu – uuden energiatalouden vaihtoehdot. Helsinki: Edita Prima Oy.

Salminen, R. & Siironen, S. 2019. Vapaavuoren yllättävä avaus: Helsinki lupaa miljoonan sille, joka keksii korvaavan ratkaisun kiistellylle kivihillelle – "Olen tosissani". YLE 3.4.2019. Viitattu 8.4.2019. <https://yle.fi/uutiset/3-10721406>

Satka, V. & Paatero, J.V. 2011. Kasvihuonekaasupäästötön energiantuotanto Suomessa. Teoksessa A. Virtanen & L. Rohweder (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä. Helsinki: Gaudeamus, 211-240.

Hall, L. 2015. Sulphur requirements in IMO emission control areas. Shipowners Club. Viitattu 1.4.2019. <https://www.shipownersclub.com/louise-hall-sulphur-requirements-imo-emission-control-areas/>

Tan, K. T. & Lee, K. T. 2011. Biodiesel production in supercritical fluids. Teoksessa Pandey, A., Larroche, C., Ricke, S. C., Dussap, C.-G. & Gnansounou, E. (toim.) Biofuels – alternate feedstocks and conversion processes. Oxford: Elsevier, 339–352.

Tekniikan Maailma. 2010. Tûranor PlanetSolar kiertää maapallon aurinkoenergialla. Viitattu 8.4.2019. <https://tekniikanmaailma.fi/turanor-planetsolar-kiertaa-maapallon-aurinkoenergialla/>

Terntank www-sivut. 2019. Viitattu 8.4.2019. <http://terntank.com/>

VG EcoFuel. 2019. VG EcoFuel – Korkealaatuista kierrätettyä polttoainetta. Viitattu 2.4.2019. <http://vgecofuel.fi/vg-ecofuel/>

Viking Lady www-sivut. 2019. Teknologi. Viitattu 21.3.2019. <http://www.vikinglady.org/>

Virtanen, A. 2011. Ilmasto- ja energiapoliittiset tavoitteet Suomessa, Euroopan unionissa ja globaalisti. Teoksessa A. Virtanen & L. Rohweder (toim.) Ilmastonmuutos käytännössä. Helsinki: Gaudeamus, 43-68.

WeTech www-sivut. 2019. Viitattu 8.4.2019. <https://wetech.fi/solutions/solution-two/>

Xianguo, L. 2007. Fuel Cells. Teoksessa Kreith, F. & Goswami, D.Y. (toim.) Handbook of energy efficiency and renewable energy. Boca Raton FL: Taylor & Francis Goup, 28-1–28-45.

Yhdistyneet kansakunnat. 2019. Katowice Climate Conference. Viitattu 18.3.2019. <http://www.un.org/en/climatechange/cop24.shtml>

Zwart, K. B. & Langeveld, J. W. A. 2010. Biogas. Teoksessa H. Langeveld, J. Sanders & M. Meeusen (toim.) The biobased economy. Lontoo: Earthscan, 180-197.