



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

AKU SILVENNOINEN

Laivapolttoaineet

MERENKULUN INSINÖÖRI

2021

Tekijä(t) Silvennoinen, Aku	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Lokakuu 2021
	Sivumäärä 35	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Laivapolttoaineet		
Tutkinto-ohjelma Merenkulun insinööri, AMK		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tieto eri laivapolttoainesta on kovin hajallaan eri teoksissa ja tutkimuksista, mutta aihe on silti tärkeä moottorikäyttöisten rahtilaivojen kannalta. Tässä tutkimuksessa keskityttiinkin eri polttoaineiden pääasiallisten ominaisuuksien keräämiseen samojen kansien sisään. Pääasiallisena tavoitteena oli tekijän oman ymmärryksen lisääminen aiheesta, mutta samalla syntynyttä tutkimusta voinee myös hyödyntää opetusmateriaalina aihetta koskevilla kursseilla.</p> <p>Tutkimus toteutettiin kirjallisuustutkimuksena. Tutkimuksen tekoaikaan koronarajoitukset olivat vielä voimassa, joten materiaali on jouduttu keräämään lähes yksinomaan internetistä.</p> <p>Tuloksena syntyi tietopaketti, joka käsittelee nykyisin käytössä olevien polttoaineiden lisäksi lyhyesti myös käytöstä poistuneita polttoaineita, sekä mahdollisia vaihtoehtoja tulevaisuuden vähäpäästöisiksi tai jopa päästöttömiksi polttoaineiksi.</p>		
<p><u>Asiasanat</u></p> <p>Laivapolttoaine; polttoöljy; uusiutuva polttoaine</p>		

Author(s) Silvennoinen, Aku	Type of Publication Bachelor's thesis	Date October 2021
	Number of pages 35	Language of publication: Finnish
Title of publication Marine Fuels		
Degree programme Bachelor's Degree in Marine Engineering		
<p data-bbox="312 696 424 723">Abstract</p> <p data-bbox="312 768 1441 947">Information about marine fuels is scattered between many books and studies, yet the field is still important to motorized shipping. In this study the focus was on collecting the primary properties of different fuels into one publication. The main objective was to increase the knowledge of the author about the subject, but at the same time the study can be used as material for courses and studies about the subject.</p> <p data-bbox="312 987 1441 1055">The study was made as a literature study. With Coronavirus restrictions in effect during the process, almost all of the material was gathered online.</p> <p data-bbox="312 1095 1441 1200">The end result is a package of information that covers in addition to current marine fuels used, the fuels that have been phased out as well as fuels that may be used some day in the future.</p>		
<p data-bbox="312 1776 424 1803">Key words</p> <p data-bbox="312 1839 772 1865">Marine fuels; Fuel Oil; Renewable Fuel</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TUTKIMUSMENETELMÄT JA RAJAUS	6
2.1	Tutkimusote	6
2.2	Rajaus.....	6
3	KIINTEÄT POLTTOAINEET.....	7
3.1	Puu	7
3.2	Kivihili	7
4	RASKAS POLTTOÖLJY	9
4.1	ISO standardi	11
4.2	Raskas polttoöljy laivalla.....	15
4.3	Rikkipitoisuus	17
5	KESKITISLEET	18
5.1	ISO standardi	18
5.2	Keskittisleet laivakäytössä	20
6	NESTEYTETTY MAAKAASU	22
6.1	Nesteytetty maakaasu laivalla.....	23
6.2	Riskit ja turvallisuus	24
6.3	LNG tulevaisuudessa	24
7	VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET	25
7.1	Biodiesel ja uusiutuva diesel.....	26
7.2	Ammoniakki	27
7.3	Metanoli	29
7.4	Vety.....	30
8	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	32
	LÄHTEET.....	33

1 JOHDANTO

Kaupallisen merenkulun merkitys ihmiskunnalle on varhaisesta historiasta asti ollut suuri. Samalla tavalla merenkulun moottoroituminen sai aikaan erittäin suuren mullistuksen maailmankauppaan ja talouteen, kun moottorin avulla liikkuvat laivat eivät enää olleetkaan riippuvaisia tuulista. Samaan aikaan teollistuminen ja tekniikan kehitys on vaikuttanut merenkulkuun ja merenkulun tekniikkaan. Tämä puolestaan on johdantanut laivojen polttoaineidenkin kehitykseen.

2000-luvun aikana on puolestaan pikkuhiljaa herätty siihen tosiasiaan, että laivojenkin päästöjä on saatava kuriin, mikä taas on saanut aikaan paineen puhtaampien polttoaineiden kehitystyölle.

Tämän opinnäytetyön syntyyn on osaltaan vaikuttanut mielenkiinto tuota kehitystä kohtaan. Työn tarkoituksena on koota yksien kansien sisälle katsaus merenkulussa käytetyistä polttoaineista ja niiden yleisistä ominaisuuksista laivakäytössä, sekä käsitellä vaihtoehtoja fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi. Työssä käydään läpi yleisimmät laivapolttoaineet, sekä historian tuntemuksen takia myös puu ja kivihiili. Tulevaisuuden vaihtoehtoista käsitellään tämänhetkisen tiedon mukaan lupaavia vaihtoehtoja.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT JA RAJAUS

2.1 Tutkimusote

Opinnäytetyön tutkimusotteena on kvalitatiivinen ote. Kvalitatiivisessa tutkimuksessa keskitytään tutkittavan ilmiön laadullisiin ominaisuuksiin määrällisten sijaan, mikä mahdollistaa ymmärryksen siitä, mistä tutkittavassa ilmiössä tai asiassa on kyse. (Kananen 2015, 71.)

2.2 Rajaus

Työssä keskitytään lähinnä polttoaineiden ominaisuuksiin niiltä osin, kuin ne ovat relevantteja laivakäytön näkökulmasta. Näin ollen poliittisia аспекteja ei käsitellä tässä työssä.

Nykypäivänä päästörajoitukset muodostavat merkittävän vaikutuksen polttoaineiden ominaisuuksille ja laivojen koneistoille, joten päästöjen merkitystä ei voi sivuuttaa. Kuitenkaan polttoaineiden valmistusprosesseihin ei ole tarkoituksenmukaista syventyä muuten kuin joissain erityistapauksissa, joissa valmistusprosessilla on erityistä merkitystä esimerkiksi päästöjen kannalta.

Polttoainejärjestelmistä, kuten separaattoreista ja rikkipesureista, on niin ikään kirjoitettu paljon, ja ne vaatisivat molemmat laajuudeltaan jo kokonaiset opinnäytetyöt, joten en näe järkeväksi käsitellä niitäkään enempää tässä opinnäytetyössä.

Polttoaineiden lisäksi tutkimuksen kohteina on myös muita propulsiomuotoja, kuten tuulivoiman hyväksikäyttö, sähkön tuotanto aurinkopaneeleilla ja ydinvoima. Nämä eivät kuitenkaan polttoaineita, vaan täysin omia energian käyttötapoja, joten niitä ei tässä tutkimuksessa käsitellä. Ydinvoiman tilanne maailmanpoliittisesti puolestaan on sellainen, että ydinvoimaa on hyvin vaikea nähdä relevanttina vaihtoehtona laivojen voimanlähteeksi.

3 KIIINTEÄT POLTTOAINEET

3.1 Puu

Puuta on käytetty polttoaineena kaupallisessa merenkulussa vain hyvin rajoitetusti, mutta sillä oli merkityksensä moottoroidun merenkulun historiassa, joten se nähdäkseen ansaitsee tulla mainituksi tässä yhteydessä.

Varhaiset höyrylaivat käyttivät polttoaineenaan puuta, sillä se oli halpaa ja sitä oli hyvin tarjolla. Puun käyttö kuitenkin väheni nopeasti, kun metsät vesireittien ympäriltä hakattiin, ja puuta piti alkaa kuljettaa kauempaan, samalla kun kivihiili valtasi markkinoita paremman soveltuvuutensa ansiosta. (steamboat.com www-sivut 2021.)

Muun muassa ensimmäinen Atlantin ylitys pelkällä höyryvoimalla tehtiin puuta polttavalla S/S Savannah-aluksella (Encyclopedia Britannica 2021). Samoin Suomessa puuta käytettiin joidenkin höyrylaivojen polttoaineena vielä 1900-luvun alkupuolella (Suomen Höyrypursiseura Ry sivusto 2021).

Eri puulajit eroavat toisistaan lämpöarvojenkin osalta, ja esimerkiksi Yhdysvalloissa puulajit oli lajiteltu kahteen eri luokkaan, joista ylempään luokkaan kuuluivat kovat puulajit, kuten tammi, pyökki, saarni ja jalava. Toiseen luokkaan laskettiin kuuluvaksi mänty, koivu, poppeli, ja vastaavat, vähemmän kuumana palavat puulajit. (steamboat.com www-sivut 2021.)

3.2 Kivihiili

Kivihiili polttoaineena tunnettiin jo ennen kuin höyrylaivaa saatiin edes kaupalliseen käyttöön, joten oli luonnollista, että kivihiili syrjäytti puun polttoaineena varsin nopeasti niillä alueilla, joilla sitä oli saatavilla. Kivihiili aloitti fossiilisten polttoaineiden aikakauden, joka on jatkunut nykypäivään asti. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Kivihiilen lämpöarvo on selvästi korkeampi kuin puulla, joten hiiltä polttamalla alusten ei tarvinnut täydentää polttoainevarastoja niin usein, mikä merkitsi vähempiä seisokkeja. Kivihiilen tuhkapitoisuus on myös pienempi, joten lämmittäjien ei tarvinnut tyhjentää tuhkaa tulipesistä niin usein, mikä taas vähensi palkatun työvoiman tarvetta. (steamboat.com www-sivut 2021.)

Kivihiili luokitellaan yleisesti kolmeen eri pääryhmään, ruskohiili, bitumihiili sekä antrasiitti. Näistä ruskohiili on nuorinta ja vähiten puhdasta hiiltä sisältävä kivihiili, sen hiilipitoisuus on yleisesti välillä 60% - 70% ja lämpöarvo on noin 17MJ/kg. Bitumihiili on puolestaan ruskohiiltä vanhempaa ja enemmän hiiltä sisältävä kivihiilen muoto. Sen hiilipitoisuus on noin 70% - 85% ja lämpöarvo välillä 24MJ/kg – 33MJ/kg. Antrasiitti on kivihiilen vanhin ja puhtain muoto. Antrasiitti sisältää 86% tai enemmän puhdasta hiiltä, ja sen lämpöarvo on noin 35MJ/kg. Kivihiilen luokitukseen on ollut käytössä useita eri järjestelmiä, mutta niihin syventyminen ei tässä kohtaa olisi tarkoituksenmukaista. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Kivihiiltä käytettiin höyrylaivojen pääasiallisena polttoaineena 1900-luvun alkupuolelle asti, jolloin se sai väistyä öljyn tieltä. (marineinsight.com www-sivusto.)

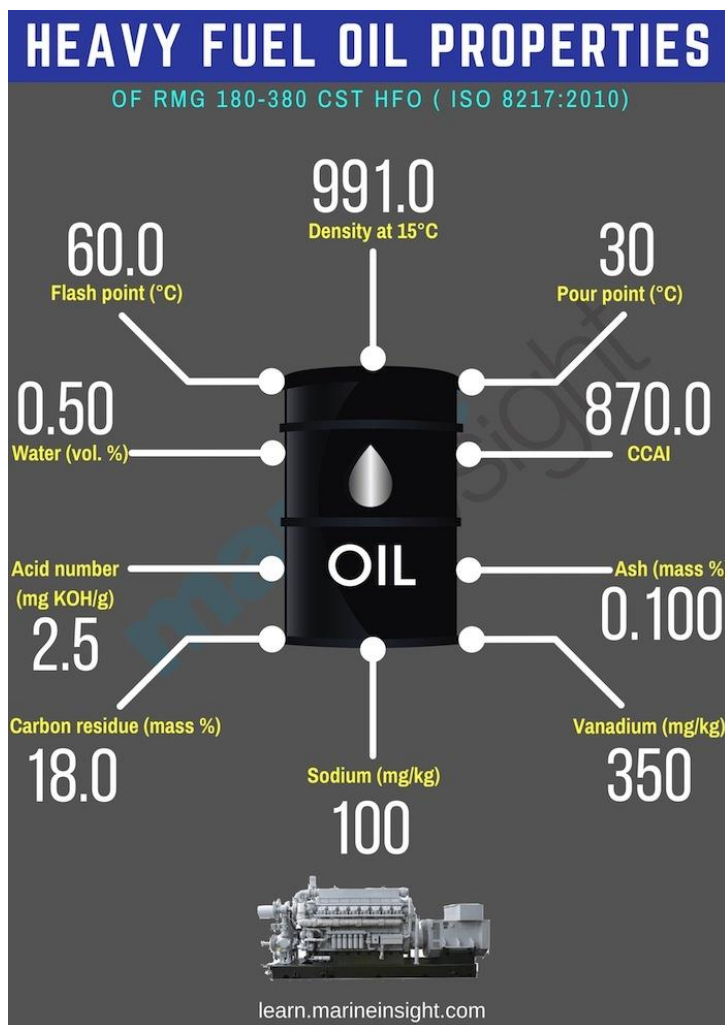
4 RASKAS POLTTOÖLJY

Raskas polttoöljy, eli HFO – heavy fuel oil, on ollut käytössä 1900-luvun alkupuolelta asti. Ensin öljyä käytettiin höyrylaivoissa kivihiilen sijaan, ja 1930-luvulla ensimmäiset raskasöljyä polttavat dieselmoottorit otettiin käyttöön. Nykyään raskas polttoöljy on yleisin polttoaine kaupallisessa merenkulussa. (marineinsight.com www-sivusto.)

Nimitys raskasöljy juontaa juurensa ajalta, jolloin polttoaineen laatu oli pääteltävissä sen tiheydestä. Sitten laatua on alettu mitata viskositeetin perusteella, ja tämä järjestelmä on pohjana nykyiselle luokitusjärjestelmälle. (Häkkinen 1993, 5.)

Raskasöljy on koostumukseltaan lähinnä öljynjalostuksen sivutuotteiden seos. Vielä 1970-luvulla raskasöljy oli pääpiirteittäin se, mitä tislaamisen jälkeen raakaöljystä jäi jäljelle. Koska pelkkä tislausprosessi ei riitä erottelemaan kaikkia kevyempiä jakeita raakaöljystä, jäljelle jäävä raskasöljy oli kohtuullisen hyvää ja tasalaatuista polttoainetta. 70-luvun öljykriisien jälkimainingeissa jalostamot alkoivat kuitenkin kehittää tehokkaampia jalostusprosesseja, kuten krakkauksen, jossa tislausjäännöksen pitkät hiilivetymolekyylit pilkotaan lyhyemmiksi joko lämmön, katalyytin tai vedyn avulla. Tämän seurauksena jäljelle jäävät sivutuotteet ovat laadultaan selvästi huonompia kuin aiemmin, ja sisältävät selvästi enemmän raskasmetalleja, tuhkaa, rikkiä ja vettä sekä muita epäpuhtauksia. (Stout & Wang 2016, 642.)

Edellä mainittu laadun heikkeneminen on aiheuttanut sen, että laatuvaatimusten täyttämiseksi raskasöljyyn sekoitetaan pieniä määriä kevyempiä polttoöljyjä, kuten esimerkiksi krakattua kaasuöljyä. Jossain vaiheessa jalostamoilla oli tapana sekoittaa raskasöljyn sekaan jopa voiteluöljyä laadun parantamiseksi, mutta tämä käytäntö on ollut kielletty 2000-luvun alkupuolelta lähtien. (Stout & Wang 2016, 643.)



Kuva 4.1. Raskasöljyn ominaisuuksia ISO 8217:2010 standardin mukaan. Standardi on vanhentunut, mutta yhtenevä nykyään käytössä olevan kanssa. (marineinsight.com www-sivusto.)

Raskaan polttoöljyn ominaisuuksia säädellään standardilla ISO 8217, josta uusin versio on vuodelta 2017. Standardissa on määritelty yksitoista eri laatua raskaalle polttoöljylle, ja laatujen perustana on polttoöljyn viskositeetti 50 celsiusasteen lämpötilassa (ISO www-sivusto 2021). Yleisimmin käytössä ovat 180mm²/s ja 380mm²/s viskositeetin omaavat laadut (Stout & Wang 2016, 645).

4.1 ISO standardi

Vielä 80-luvun alkupuolella raskasöljylle oli käytössä useita eri kaupunimiä ja määritelmiä. Puhuttiin ”Bunker C” -öljystä, Numero 6 -öljystä, tai vain raskasöljystä. British Standards Institution piti yllä BS 2869 standardia polttoaineille yleisesti, mutta se käsitteli lähinnä keskitisleitä ja jätti tislaujäännöksistä tehdyt polttoöljyt vähälle huomiolle. Tämän epäkohdan korjaamiseksi BS alkoi työstää uutta standardia, mutta koska nopeasti ymmärrettiin tämän standardin koskevan meriliikennettä maailmanlaajuisesti, työ annettiin ISO:n - International Organization for Standardization – tehtäväksi. (Fisher & Meech 2013, 57.)

Uuden standardin kehitystyö on hidasta, joten BS julkaisi vuonna 1981 luonnoksen työn alla olevasta uudesta standardista nimellä BS 100:1982, josta tuli ensimmäinen laivapolttoaineita käsittelevä standardi. Toisaalta myös moottorivalmistajien kansainvälinen liitto CIMAC (ranskankielestä Conseil International des Machines à Combustion) julkaisi omia suosituksiaan jäsenyritystensä valmistamiin moottoreihin sopivista polttoaineista (Fisher & Meech 2013, 58.)

Ensimmäinen ISO standardi laivapolttoaineille, ISO 8217, julkaistiin vuonna 1987. Sitä on sittemmin uudistettu vuosina 1996, 2005, 2012 ja nykyinen käytössä oleva versio on vuodelta 2017. Standardissa on määritetty vaatimukset sekä raskasöljylle että keskitisleille. Keskitisleiden ominaisuuksia käsitellän kuitenkin vasta myöhemmässä luvussa. (Fisher & Meech 2013, 58.)

REQUIREMENTS FOR MARINE RESIDUAL FUELS

Characteristic	Unit	Limit	Category ISO-F-										Test method reference	
			RMA 10	RMB 30	RMD 80	RME 180	RMG				RMK			
			180,0	380,0	500,0	700,0	380,0	500,0	700,0					
Kinematic viscosity at 50 °C	mm ² /s ^a	Max	10,00	30,00	80,00	180,0	180,0	380,0	500,0	700,0	380,0	500,0	700,0	ISO 3104
Density at 15 °C	kg/m ³	Max	920,0	960,0	975,0	991,0	991,0				1010,0		ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1	
CCAI	–	Max	850	860	860	860	870				870		see 6.2	
Sulfur ^b	mass %	Max	Statutory requirements										ISO 8754 or ISO 14596 or ASTM D4294; see 6.3	
Flash point	°C	Min	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0				60,0		ISO 2719; see 6.4	
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00				2,00		IP 570; see 6.5	
Acid number ^c	mg KOH/g	Max	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5				2,5		ASTM D664; see 6.6	
Total sediment – Aged	mass %	Max	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10				0,10		ISO 10307-2; see 6.9	
Carbon residue – Micro method	mass %	Max	2,50	10,00	14,00	15,00	18,00				20,00		ISO 10370	
Pour point (upper) ^d	winter	°C	0	0	30	30	30				30		ISO 3016	
	summer	°C	6	6	30	30	30				30			
Water	volume %	Max	0,30	0,50	0,50	0,50	0,50				0,50		ISO 3733	
Ash	mass %	Max	0,040	0,070	0,070	0,070	0,100				0,150		ISO 6245	
Vanadium	mg/kg	Max	50	150	150	150	350				450		IP 501, IP 470 or ISO 14597; see 6.14	
Sodium	mg/kg	Max	50	100	100	50	100				100		IP 501, IP 470; see 6.15	
Aluminium plus silicon	mg/kg	Max	25	40	40	50	60				60		IP 501, IP 470 or ISO 10478; see 6.16	
Used lubricating oil (ULO):			Calcium > 30 and zinc > 15 or Calcium > 30 and phosphorus > 15											
– Calcium and zinc; or – Calcium and phosphorus	mg/kg	–											IP 501 or IP 470, IP 500; see 6.17	

a 1 mm²/s = 1 cSt.

b The purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

c See Annex E.

d Purchasers should confirm that this pour point is suitable for the ship's intended area of operation.

Permission to reproduce extracts of standards has been granted by Standard Norge. No other use of this material is permitted. Full standards may be obtained from the Standard Norge online shop, found at: <https://www.standard.nor/en/webshop/>

Kuva 4.2. ISO 8217:2017 standardin vaatimukset raskaille polttoöljyille. (World Fuel Services sivusto.)

Viskositeetti – Raskaan polttoöljyn viskositeetti ilmoitetaan 50 celsiusasteen lämpötilassa. Standardissa käytetty yksikkö on senttistoke cSt, eli mm²/s. Ennen modernien tislusmenetelmien käyttöönottoa viskositeetti oli pääasiallinen öljyn laadun mittari, mutta nykyään kaikki polttoaineet ovat eri öljyjen seoksia, joten viskositeettia voidaan alentaa helposti sekoittamalla polttoöljyyn ohuempaa öljyä. (Häkkinen 1993, 160.)

Tiheys – Raskasöljyn tiheyden vaihteluväli on noin 900 ... 1010 kg/m³. Tiheyden primäärinen merkitys on polttoaineen separoinnin helppous. Mitä lähempänä polttoaineen tiheys on veden tiheyttä (1000 kg/m³), sitä hankalammin se on separoitavissa. Separointi vaikeutuu merkittävästi, kun polttoöljyn tiheys nousee yli 991:n. (Häkkinen 1993, 160.)

CCAI – Calculated carbon aromaticity index. CCAI-arvo mittaa polttoaineen syttyvyyttä. Arvon vaihteluväli on normaalisti 700 ... 880. Korkeampi arvo merkitsee huonompaa syttyvyyttä, ja yli 860 arvon katsotaan tarkoittavan vaikeasti syttyvää polttoainetta. (Häkkinen 1993, 161.)

Rikkipitoisuus – Rikkipitoisuutta ei suoraan määritellä standardissa, vaan rajoitukset tulevat IMO:n Marpol konventiosta. Ilman rikkipesureita suurin sallittu polttoaineen rikkipitoisuus on yleisesti 1,5%, ja päästörajoitusalueilla 0,1%. (IMO www-sivusto 2021.)

Leimahduspiste – Matalin lämpötila, jossa polttoaine muodostaa höyryjä, jotka ulkopuolinen syttymislähde saa leimahtamaan (Encyclopedia Britannica 2021). Leimahduspiste määritetään ISO-standardin mukaisella kokeella, ja pieni laivapolttoaineille sallittu arvo on 60°C (Häkkinen 1993, 160).

Vety sulfidi – Vety sulfidi, H₂S, on erittäin myrkyllinen kaasu, jota esiintyy raakaöljyssä, tai sitä voi syntyä jalostusprosessin aikana. Sille on ominaista mädän kananmunan haju, joka kuitenkin katoaa, kun kaasun pitoisuus ilmassa kasvaa. Vety sulfidi on erittäin haitallista jo hyvin pieninä pitoisuuksina, jo 5ppmv pitoisuus voi aiheuttaa pahoinvointia, ja 700ppmv pitoisuus aiheuttaa välittömän kuolemanvaaran. Tämän myrkyllisyyden takia aineen pitoisuus polttoaineen seassa on rajoitettu. (Marine fuels and hydrogen sulphide 2013, 2 – 4)

Happoluku – Öljyjen happamuutta ei voida mitata pH-lukemalla, joten sen sijaan käytetään happolukua. Se määritetään mittaamalla öljyn happamuuden neutralointiin kuluvan kaliumhydroksidin määrä. (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 9.)

Sedimentit – Raskas polttoöljy sisältää aina sedimenttejä, jotka voivat olla orgaanisia tai epäorgaanisia. TSP (Total Sediment Potential) -analyysillä selvitetään polttoaineesta sedimenttien määrä, vakaus, eli sedimenttien taipumus hajota suodattimia tukkiviksi asfalteenihiutaleiksi, ja yhteensopivuus muiden polttoainelaatujen kanssa. (Woodyard & Latache 2009, 98.)

Hiiltojäännös – Hiiltojäännös syntyy polttoainenyhteen pyrolyysin ja haihtumisen myötä hapettomassa tilassa (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama & Korhonen 2016, 10). Korkea hiiltojäännös viittaa huonosti syttyvään ja moottoria likaavaan öljyyn (Häkkinen 1993, 161).

Jähmepiste – Jähmepiste on alin lämpötila, jossa polttoaine on vielä nestemäisessä muodossa, mikä on erittäin tärkeä tieto polttoaineen käsittelyä ajatellen. Polttoaineen lämpötila tulisi pitää noin 5°C ... 10°C jähmepisteen yläpuolella pumpattavuuden säilyttämiseksi. (Woodyard & Latarche 2009, 99.)

Vesi – Raskasöljy sisältämän veden standardinmukainen maksimimäärä laskee vuonna 1996 0,5 prosenttiin (Fisher & Meech 2013, 62). Jos vesipitoisuus on sitä suurempi, on todennäköistä, että polttoainetankkeihin on päässyt vettä. Liian suurina määrinä vapaa vesi voi vaurioittaa polttoaineen suihkutusjärjestelmiä, huonontaa palamistapahumaa, ja aiheuttaa ennen aikaista kulumista. Merivesi puolestaan aiheuttaa korroosiota sylinteriputkiin (Woodyard & Latarche 2009, 90). Toisaalta erittäin hienojakoisena sillä on palamisen ja päästöjen kannalta jopa edullisia vaikutuksia. Separaattorissa raskasöljyn vesipitoisuus laskee yleensä alle 0,1%:n. (Häkkinen 1993, 161.)

Tuhka – Tuhkapitoisuus tarkoittaa polttoaineessa olevia epäorgaanisia palamattomia epäpuhtauksia, kuten hiekka, pii, nikkeli, alumiini, natrium ja vanadium. Tuhkalla on taipumus kerääntyä moottoriin ja pakokaasulaitteistoihin, erityisesti turboahtimeen. Nämä kerääntymät aiheuttavat aineesta ja paikasta riippuen korroosiota, virtausvastuksia pakokaasuille tai värähtelyjä ja epätasapainoa turboahtimeen. Osa tuhkasta saadaan poistettua separaattorilla, mutta osaan voidaan vaikuttaa vain hyvällä polttoaineen laadulla. (Woodyard & Latarche 2009, 97.)

Vanadiini – Vanadiini on peräisin raakaöljystä itsestään, tai virheellisestä katalyyttiannostelusta jalostamalla. Sen poistaminen ei ole mahdollista laivojen polttoaineenkäsittelyjärjestelmillä. Vanadiini on tärkein yksittäinen korroosion aiheuttaja korkeissa lämpötiloissa. Se muodostaa natriumin ja rikin kanssa yhdisteitä, joiden sulamispiste voi olla niinkin alhainen kuin vain 530°C. Nämä yhdisteet ovat erittäin syövyttäviä, ja tuhoavat herkästi teräksen pinnassa olevat suojaavat oksidikerrokset, altistaen teräksen

muullekin korroosiolle. Vanadiini aiheuttaa myös mineraalikertymiä pakventtiileihin. (Woodyard & Latarche 2009, 92.)

Natrium – Natriumin esiintyminen polttoaineessa viittaa lähinnä meriveteen polttoaineen seassa, mutta mikäli polttoöljyn vesipitoisuus on matala, voi natrium olla peräisin myös jalostusprosessissa käytettävästä natriumhydroksidista. Korkea natriumpitoisuus lisää tuhkan määrää. (Fisher & Meech 2013, 283.)

Pii ja alumiini – Pii ja alumiini ovat jalostusprosessissa käytettäviä katalyyttejä. Niiden oksidit muodostavat hienojakoisia, erittäin kovia partikkeleja, jotka aiheuttavat erittäin nopeaa kulumista polttoainepumpuissa, sylinteriputkissa ja männänrenkaissa. Kunolla toimivilla separaattoreilla ja suodattimilla saadaan poistettua noin 80% näistä partikkeleista. (Fisher & Meech 2013, 283, 285.)

Käytetyt voiteluaineet – Käytettyjen voiteluaineiden lisääminen raskaaseen polttoöljyyn kiellettiin 2000-luvun alussa. Kiellon valvonnan helpottamiseksi sinkin, fosforin ja kalsiumin pitoisuuksille on asetettu raja-arvot. Näiden raja-arvojen on kaikkien ylittävä, että öljyn seassa katsotaan olevan käytettyä voiteluöljyä. (Fisher & Meech 2013, 301.)

4.2 Raskas polttoöljy laivalla

Raskasöljy ei ole puhdas polttoaine. Tislausjäännösten seoksena se sisältää monia epäpuhtauksia, joista monia onkin jo edellä lueteltu. Tämä tarkoittaa sitä, että raskasöljyllä on ominaisuuksia, jotka vaativat erityistä huomiota käytettävyyden säilyttämiseksi. Seuraavassa käydään läpi näitä ominaisuuksia, mutta koska raskaan polttoöljyn puhdistuksesta ja käsittelystä on jo kirjoitettu useita opinnäytetöitä, rajataan polttoaineen tarkempi käsittelyprosessi tästä opinnäytetyöstä pois.

Raskasöljy sisältää jonkin verran sedimenttiä, joka koostuu muun muassa hiekasta, savesta ja asfalteenista. Sedimentillä on taipumus muodostaa sakkaa bunkkeritankkien pohjalle. Jos kerrostunut sakka pääsee liian suuressa määrin polttoainejärjestelmään, se aiheuttaa herkästi tukoksia suodattimiin ja separaattoreihin, sekä saattaa aiheuttaa

vaurioita polttoaineen ruiskutusventtiileihin (Woodyard & Latache 2009, 89). Lisäksi sakan kertyminen saattaa ylikuormittaa polttoainepumppuja, mikä voi pahimmillaan johtaa jopa moottorivaurioihin (Fisher & Meech 2013, 287). Tehokas ja vakiintunut tapa moottorin suojaamiseksi näiltä kiinteiltä aineilta on separointi. Puhdistus pelkätään suodattimilla on todettu toimivaksi ainoastaan tislauksella polttoaineilla (Häkkinen 1993, 163).

Raskasöljyn viskositeetti on tyypillisesti korkea, mikä aiheuttaa sen, että sitä on lämmitettävä juoksevuuden säilyttämiseksi. Pumpattavuuden rajana pidetään yleisesti 600cSt, mutta jos polttoaine joudutaan imemään tankista kovin pitkien putkien läpi, on polttoainetta syytä lämmittää lisää matalamman viskositeetin saavuttamiseksi (Fisher & Meech 2013, 271). Raskasöljylle tarkoitettujen polttoaineputkien on eristetty ja varustettu saattolämmityksellä juoksevuuden säilyttämiseksi (Häkkinen 1993, 162).

Raskaan polttoöljyn koostumus ja ominaisuudet voivat vaihdella erittäin paljon. Tämä johtuu raakaöljyn ominaisuuksien eroista, sekä tislauksprosessien, ja käytettyjen seoskomponenttien eroavaisuuksista (Fisher & Meech 2013, 41). Seurauksena eri raskasöljyalaadut eivät ole välttämättä keskenään yhteensopivia. Keskenään yhteensopimattomia polttoaineita sekoitettaessa öljyssä oleva asfalteeni hiutaloituu, mistä aiheutuu erittäin voimakasta sakkaantumista (Srivastava & Hancsó 2014, 346).

Laivan miehistön kannalta huomionarvoinen seikka on sekin, että raskasöljyn voimakkaasti kilpaillut markkinat sekä polttoaineen itsensä jäännöstuotteen omainen luonne asettavat laivojen polttoainetäydennykset alttiiksi monenlaiselle huijaustoiminnalle. Mutta vaikka toiminta ei olekaan niin yleistä kuin mediaotsikoiden ja kuulopuheiden perusteella voisi päätellä, huijausyrityksiin on silti syytä varautua. (Harrison, Bankes-Hughes & Cutler 2011, 69.)

Raskas polttoöljy on luonteeltaan lähinnä se, mitä raakaöljyn tislauksesta jää jäljelle, joten se voi olla hinnaltaan jopa halvempaa kuin raakaöljy itse. Tästä seuraa luonnollisesti se, että jalostamot haluavat tehdä kaikkea muuta paitsi raskasöljyä, jolloin on odotettavissa, että raskasöljyn laatu jatkaa laskemistaan. Näin ollen laatuongelmatkaan

eivät välttämättä kaikki johdu pelkästä pahantahtoisesta huijauksesta, vaan markkinoiden luonnollisen reaktion aiheuttamasta polttoaineen komponenttien laadun heikkeneemisestä. (Harrison, Bankes-Hughes & Cutler 2011, 69.)

Ehkä yleisimpiä kiistan aiheita polttoainetäydennyksissä on näkemuserot toimitetun määrän suhteen. Bunkkeriproomun miehistöllä on mahdollisuuksia saada toimitetun polttoaineen määrä näyttämään suuremmalta, kuin mitä se todellisuudessa on. Polttoaineen tilavuus kasvaa lämpötilan kasvaessa, joten polttoaineen lämpötilan on syytä tarkkailla täydennyksen aikana. Raskaan polttoöljyn sekaan on myös mahdollista puhalttaa ilmaa, jolloin öljy vaahtoa, ja sen tilavuus luonnollisesti kasvaa. Ilma voi säilyä raskasöljyn seassa kymmeniä tunteja, joten sen katoaminen ja öljyn pinnan lasku tankissa saattaa näkyä vasta päivä tai kaksi täytön jälkeen. (Fisher & Meech 2013, 208.)

4.3 Rikkipitoisuus

Raskas polttoöljy on hyvin rikkipitoinen polttoaine, ja palaessaan rikki muodostaa rikkioksideja. Yhdessä typen oksidien kanssa nämä ovat pääasiallinen happamien sateiden aiheuttaja (Encyclopedia Britannica 2021). Tästä syystä Kansainvälinen merenkulkujärjestö, IMO, onkin rajoittanut rikin määrää laivapolttoaineissa jo useamman vuoden ajan. Viimeisin rikkipitoisuuden rajan kiristys astui voimaan vuoden 2020 alussa, jolloin ECA-alueiden ulkopuolella suurin sallittu rikkipitoisuus polttoaineessa laski 0,5%:in. Edelleen on toki mahdollista käyttää suurempien rikkipitoisuuksien polttoaineita, mikäli laiva on varustettu asianmukaisella pakokaasun rikkipesurilla. ECA-alueiden sisällä polttoaineen suurin sallittu rikkipitoisuus ilman rikkipesuria on 0,1%. (IMO www-sivusto 2021).

Vielä viime vuosikymmenen alkupuolella uskottiin, että 0,5% rikkiä sisältävät polttoaineet olisivat väistämättä tisleitä eikä jäännöspolttoaineita, koska riittävän matalarikkisiä tislaujäännöksiä ei olisi markkinoilla (Fisher & Meech 2013, 5). Tämä kuvaitelma on sittemmin osoittautunut vääräksi, ja esimerkiksi kotimainen Neste myy vähärikkistä Neste Marine 0.5 raskasöljyä, joka on tuotetiedoiltaan yhtenevä ISO 8217:2017 standardin RMG380 polttoöljyn vaatimuksien kanssa (Neste www-sivusto 2021.)

5 KESKITISLEET

Keskitisleistä tunnetuin esimerkki on dieselöljy, joka on yleisessä käytössä tieliikenteen polttoaineena. Laivoilla käytössä olevat keskitisleet ovat hyvin dieselin kaltaisia polttoaineita, mutta niitä koskevat eri standardit ja lainsäädäntö.

Yleisimmin käytössä ovat kaasuöljy MGO – marine gas oil, sekä laivadiesel MDO – marine diesel oil. Näistä kaasuöljy on lähellä tieliikenteen dieseliä. Se on puhdas keskitisle, kevyt, väriltään kirkas öljy. Laivadiesel puolestaan on seos, joka sisältää pieniä määriä raskasöljyä, joka tekeekin laivadieselistä väriltään mustaa. Yhteinen tekijä näille polttoaineille on matala viskositeetti huoneenlämmössä, joten niitä ei tarvitse lämmittää ennen syöttöä moottoriin. (Ship and Bunker www-sivusto 2021.)

5.1 ISO standardi

Tislatuille laivapolttoaineille on omat luokkansa ja niiden mukaiset vaatimuksensa ISO 8217 standardissa. Huomattava yksityiskohta standardin laaduista on DMX, jonka leimahduspiste on minimissään 43°C. Tämä on selvästi alle konehuoneessa sallitun minimin 60°C, joten kyseistä polttoainetta voidaan käyttää lähinnä hätägeneraattoreissa ja pelastusveneissä. DMA on puhdas kaasuöljy, ja DMB taas laivadiesel. (Fisher & Meech 2013, 59.) DMZ on muuten täysin vastaava kaasuöljy kuin DMA, mutta sillä on hiukan suurempi minimiviskositeetti, sillä hyvin matalan viskositeetin on pelätty aiheuttavan ongelmia joissain pumpuissa ja kattiloiden öljypolttimissa (Fisher & Meech 2013, 68).

F-kirjaimen sisältävät laadut ovat uusin tulokas standardiin. Ne ovat muuten identtisiä niitä vastaavien aiempien laatujen kanssa, mutta niihin on lisätty sallitun FAME-komponentin määrä. FAME, eli Fatty Acid Methyl Ester, on ensimmäisen sukupolven biodiesel, jota lisätään joissain maissa tieliikenteen dieselöljyn sekaan ympäristösyistä. F-loppuisten laatujen tarkoitus on helpottaa laivalle soveltuvan polttoaineen hankkimista sellaisissa satamissa, joissa nimenomaista laivapolttoainetta ei ole saatavilla. (Ship & Bunker www-sivusto 2021.)

REQUIREMENTS FOR MARINE DISTILLATE FUELS

Characteristic	Unit	Limit	Category ISO-F-						Test method(s) and references	
			DMX	DMA	DFA	DMZ	DFZ	DMB		DFB
Kinematic viscosity at 40 °C	mm ² /s ^a	Max	5,500	6,000		6,000		11,00	ISO 3104	
		Min	1,400	2,000		3,000		2,000		
Density at 15 °C	kg/m ³	Max	–	890,0		890,0		900,0	ISO 3675 or ISO 12185; see 6.1	
Cetane index	–	Min	45	40		40		35	ISO 4264	
Sulfur ^b	mass %	Max	1,00	1,00		1,00		1,50	ISO 8754 or ISO 14596, ASTM D4294; see 6.3	
Flash point	°C	Min	43,0	60,0		60,0		60,0	ISO 2719; see 6.4	
Hydrogen sulfide	mg/kg	Max	2,00	2,00		2,00		2,00	IP 570; see 6.5	
Acid number	mg KOH/g	Max	0,5	0,5		0,5		0,5	ASTM D664; see 6.6	
Total sediment by hot filtration	mass %	Max	–	–		–		0,10 ^c	ISO 10307-1; see 6.8	
Oxidation stability	g/m ²	Max	25	25		25		25 ^d	ISO 12205	
Fatty acid methyl ester (FAME) ^e	volume %	Max	–	–	7,0	–	7,0	–	7,0	ASTM D7963 or IP 579; see 6.10
Carbon residue – Micro method on the 10 % volume distillation residue	mass %	Max	0,30	0,30		0,30		–	ISO 10370	
Carbon residue – Micro method	mass %	Max	–	–		–		0,30	ISO 10370	
Cloud point ^f	winter	°C	Max	–16	report	report		–	ISO 3015; see 6.11	
	summer	°C	Max	–16	–	–		–		
Cold filter plugging point ^f	winter	°C	Max	–	report	report		–	IP 309 or IP 612; see 6.11	
	summer	°C	Max	–	–	–		–		
Pour point (upper) ^f	winter	°C	Max	–	–6	–6		0	ISO 3016; see 6.11	
	summer	°C	Max	–	0	0		6		
Appearance			Clear and Bright ^g						^e	see 6.12
Water	volume %	Max	–	–		–		0,30 ^c	ISO 3733	
Ash	mass %	Max	0,010	0,010		0,010		0,010	ISO 6245	
Lubricity, corrected wear scar diameter (WSD) at 60 °C ^h	µm	Max	520	520		520		520 ^d	ISO 12156-1	

^a 1 mm²/s = 1 cSt.

^b Notwithstanding the limits given, the purchaser shall define the maximum sulfur content in accordance with relevant statutory limitations. See Introduction.

^c If the sample is not clear and bright, the total sediment by hot filtration and water tests shall be required, see 6.8 and 6.12.

^d If the sample is not clear and bright, the test cannot be undertaken and therefore, compliance with this limit cannot be shown.

^e See 5.1 and Annex A.

^f Pour point cannot guarantee operability for all ships in all climates. The purchaser should confirm that the cold flow characteristics (pour point, cloud point, cold filter, plugging point) are suitable for the ship's design and intended voyage. See 6.11.

^g If the sample is dyed and not transparent, then the water limit and test method as given in 6.12 shall apply.

^h This requirement is applicable to fuels with a sulfur content below 500 mg/kg (0,050 mass %).

Permission to reproduce extracts of standards has been granted by Standard Norge. No other use of this material is permitted. Full standards may be obtained from the Standard Norge online shop, found at: <https://www.standard.no/en/webshop/>

Kuva 5.1. ISO 8217:2017 standardin vaatimukset tislatuille laivapolttoaineille. (World Fuel Services www-sivusto 2021.)

Setaaniluku – Setaanilukua käytetään mittaamaan polttoaineen syttyvyyttä. Matala setaaniluku eli huono syttyvyys rasittaa moottoria, vaikeuttaa käynnistystä ja heikentää polttoaineen palamista erityisesti nopeakäyntisillä moottoreilla. (Richards & Coley 2005, 25.)

Hapettumisvakaus – Nykypäivän dieselöljyssä on merkittävä määrä krakkaamalla valmistettuja sekä vetykäsittelyä komponentteja. Vähäinen vetykäsittely jättää öljyyn paljon olefiinisia komponentteja, kun taas voimakas käsittely poistaa öljyssä valmiiksi esiintyviä hapettumista estäviä aineita. Tämä nopeuttaa polttoöljyn hapettumista, josta seuraa kiinteän aineen muodostumista, mikä taas johtaa suodattimien ja ruiskutuslaitteiden tukkeutumiseen (Richards & Coley 2005, 599). Hapettumisvakautta mitataan

lämmittämällä polttoöljyä ja johtamalla sen sekaan ilmaa. Testin jälkeen öljystä mitataan sinne kertynyt kiinteä materiaali, jonka maksimimäärä ilmoitetaan standardissa (Richards & Coley 2005, 540).

FAME – Sanoista Fatty Acid Methyl Esther. FAME on ensimmäisen sukupolven biodiesel, joka on yhdistetty mikrobikasvusto-ongelmiin polttoaineessa. Tämän takia FAME:n käyttöä polttoöljyjen seassa on rajoitettu voimakkaasti. (Neste [www-sivusto](http://www.neste.com) 2021.)

Samepiste – Samepisteellä tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa polttoöljyn sisältämä parafiini alkaa kiteytyä muodostaen silmällä havaittavaa sameutta polttoaineeseen. Yhdessä jähmepisteen kanssa näillä arvoilla mitataan polttoaineen kylmänkestoa. (Richards & Coley 2005, 495.)

Ulkonäkö – DMB laatua lukuunottamatta kevytöljyjen on oltava ulkonäöltään kirkkaita. Väriaineiden käyttö on kuitenkin sallittua. DMB:n sisältämän raskasöljykomponentin takia se on mustaa, eikä sille ole ulkonäkövaatimusta. (Fisher & Meech 2013, 68.)

Voitelevuus – Voitelevuuden vaatimus lisättiin standardiin vuoden 2010 päivityksessä (Fisher & Meech 2013, 68). Muun muassa rikin poisto öljystä aiheuttaa sen luontaisen voitelevuuden heikkenemistä, minkä takia standardiin on katsottu tarpeelliseksi lisätä vaatimus voitelevuudesta (MAN Energy Solutions [www-sivusto](http://www.manenergy.com) 2021).

Muut standardissa mainitut ominaisuudet ovat yhteneviä raskasöljyn standardin vastaavien kanssa, joten niiden auki selittäminen tässä yhteydessä toiseen kertaan ei olisi järkevää.

5.2 Keskitisleet laivakäytössä

Keskitisleiden käyttö on kasvanut selvästi ECA-alueiden 0,1% rikkipitoisuusrajan myötä. Vaikka keskitisleet ovat hinnaltaan selvästi raskaita öljyjä kalliimpia, niiden

avulla rikkipitoisuuden vaatimus on helppoa saavuttaa ilman suuria investointeja pakokaasun käsittelyjärjestelmiin. Niiden käyttö ei vaadi polttoainetankkien ja -linjojen uusimista kuten LNG:n käyttö vaatisi. (Wilhelmsen Ships Service [www-sivusto](#) 2021.)

Toisaalta kevyt polttoöljy aiheuttaa omat haasteensa moottorille, joka on suunniteltu pääasiallisesti raskasöljykäyttöön. Keskitisleiden pienempi viskositeetti voi alentaa polttoaineen ruiskutuspainetta, mikä puolestaan heikentää palamistapahtumaa. Samoin keskitisleen voitelevuus ei välttämättä ole riittävää raskasöljylle tarkoitetulle ruiskutuspumppulle. Esimerkiksi MAN suosittelee polttoaineen jäähdyttimen käyttöä kaksitahtikoneissaan kevytöljyllä ajettaessa. (MAN Energy Solutions [www-sivusto](#) 2021.)

Hyvin yleinen keskitisleiden käyttökohde on ollut ECA-alueilla, joilla polttoaineen suurin sallittu rikkipitoisuus on vain 0,1%, kun muualla raja on 0,5%. Tällöin laiva vaihtaa polttoainetta vähärikkiseen ennen ECA-alueelle purjehtimista. Polttoaineen vaihto on prosessina yksinkertainen, mutta koska siinä sekoitetaan kahta mahdollisesti hyvin erilaista polttoöljyä keskenään, prosessissa on omat selvät riskinsä. Raskaan öljyn asfalteenit saattavat jähmettyä muodostaen lietettä, joka voi tukkia suodattimet tai ruiskutuspumppun. Samoin laadunvaihto aiheuttaa selvän muutoksen polttoaineen lämpötilassa. Vaihdettaessa kevyelle eli viileälle öljylle, liian nopea vaihto voi laskea raskaan öljyn lämpötilan jähmettymislämpötilansa alapuolelle, jolloin jähmettyvä polttoaine tukkii polttoainelinjat, mikä johtaa moottorin sammumiseen. Liian hidas vaihto puolestaan voi aiheuttaa sen, että polttoaineen rikkipitoisuus ei ehdi laskea vaaditulle tasolle ennen ECA-alueelle ajamista. ([marineinsight www-sivusto](#) 2021.)

6 NESTEYTETTY MAAKAASU

Nesteytetty maakaasu eli LNG – Liquefied Natural Gas – ei ole uusi polttoaine. Kaasutankkerit ovat käyttäneet lastinaan olevaa nestekaasua polttoaineenaan jo yli viidenkymmenen vuoden ajan. Ensimmäinen LNG:tä käyttävä muu kuin tankkeri oli norjalainen roro-alus Glutra, joka rakennettiin vuonna 2000. Det Norske Veritas teki ensimmäisenä luokituslaitoksena säännöt kaasukäyttöisille laivoille vuonna 2001. Näitä sääntöjä käytettiin sittemmin pohjana IMO:n ohjeistukselle kaasukäyttöisten laivojen turvallisuudesta. (Studies on the Feasibility... 2016, 12.)

Nesteytetty maakaasu on herkästi syttyvä kaasumaisten hiilivetyjen seos, jonka tärkeimmät komponentit ovat metaani (CH₄) ja etaani (C₂H₆). Nesteytetty maakaasu valmistetaan yksinkertaisesti jäähdyttämällä maakaasu alle kiehumispisteensä (-162°C), jolloin se tiivistyy nestemäiseen muotoon ja sen tilavuus pienenee 600-kertaisesti nesteenä verrattuna kaasufaasiin. Se varastoidaan kaksikuorisissa eristetyissä säiliöissä noin 1bar paineessa. Käyttöä varten nesteytetty maakaasu muutetaan takaisin kaasumaiseksi, mikä onnistuu helposti vain nostamalla kaasun lämpötilaa. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

LNG:stä puhuttaessa on hyvä huomata, että kyseessä ei ole sama aine, kuin mitä kuluttajille myydään nestekaasuna. Kuluttajille myytävä nestekaasu LPG (sanoista Liquefied Petroleum Gas) on nesteytettyä propaanin ja butaanin seosta. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Muussa kuin LNG-tankkerien käytössä nestekaasu on sen verran uusi polttoaine, että sen bunkraukselle on tehty ensimmäinen standardi vasta vuonna 2017, ja varsinainen polttoaineen laatua koskeva standardi vasta vuonna 2020. Nämä standardit ovat ISO 20519:2017, *Ship and marine technology – Specification for bunkering of liquefied natural gas* ja 23306:2020, *Specification of liquefied natural gas as a fuel for marine applications*. (ISO www-sivusto 2021.)

6.1 Nesteytetty maakaasu laivalla

Nesteytetty maakaasu laivapolttoaineena on yleistynyt viime vuosien aikana voimakkaasti. Syy tälle löytyy koko ajan tiukentuvista päästörajoituksista, joiden myötä raskasöljyä polttoaineenaan käyttävä laiva tarvitsee monimutkaisia puhdistusjärjestelmiä sekä polttoaineelle että pakokaasuille. Samaan aikaan raskasöljyn ja LNG:n hintaero on pienentynyt, joten monet varustamot ovat alkaneet pitää LNG:tä hyvänä vaihtoehtona myös taloudellisesti. LNG:n käytöllä näyttäisi olevan myös selvä PR-arvo, sillä hyvin monissa LNG:tä käyttävissä laivoissa sitä myös mainostetaan näyttävillä teksteillä aluksen kyljissä. (IMO www-sivusto 2021.)

Nesteytetyn maakaasun vahvuudeksi luetaan se, että sen avulla nykyisten laivadiieselien rikki-, typpi- ja pienhiukkaspäästöt saadaan tehokkaasti kuriin ilman monimutkaisia pakokaasupesureita. Verrattuna perinteiseen raskasöljyyn, LNG:llä on mahdollista saada aikaan 85% vähennys typen oksideihin ja lähes 100% vähennys rikkioksidiin. Tämän lisäksi myös kasvihuonekaasupäästöt pienenevät LNG:tä käytettäessä. (Studies on the Feasibility... 2016, 12.)

Toisaalta LNG vaatii selvästi enemmän tilaa kuin vastaavan energiasisällön omaava öljymäärä. Tätä korostaa LNG:n vaatima tankkien eristys, joka lisää tankkien vaatimaa tilaa. Tämä johtaa siihen, että LNG-käyttöisen laivan lastikapasiteetti on väistämättä pienempi kuin vastaavan kokoinen öljyä polttavan aluksen, sillä siihen ei yksinkertaisesti mahdu yhtä paljoa lastitilaa kuin tavanomaiseen alukseen. (Fisher & Meech 2013, 161.)

Täydellistä eristystä ei ole mahdollista tehdä, joten nesteytetyllä maakaasulla on taipumus lämmetä ja höyrystyä säiliössä. Tämä ei ole ongelma liikkuvassa aluksessa, joka voi käyttää höyrystyvän kaasun suoraan polttoaineenaan, mutta paikoillaan olevassa aluksessa, jonka kulutus on vähäisempää kuin höyrystyvän kaasun määrä, on höyrystynyt kaasu joko nesteytettävä uudelleen, tai sitä on vapautettava ilmakehään paineen liiallisen kasvun välttämiseksi tankissa. (Future Ship Powering Options 2013, 30.)

6.2 Riskit ja turvallisuus

Vaikka LNG ei olekaan myrkyllistä, se muodostaa tukehtumisriskin, mikäli vuotava kaasu pääsee syrjäyttämään hapen. Lisäksi se on hajuton ja väritön, joten sitä ei voi havaita ihmisaistein, mikäli kaasuun ei ole lisätty hajustetta. Ja koska LNG laajenee erittäin voimakkaasti olomuotoaan vaihtaessaan, LNG:n vuoto nestemäisenä voi syrjäyttää hapen hyvinkin suuresta osasta alusta kerrallaan. Lisäksi LNG:n kylmyydestä johtuen altistuminen nestemäiselle kaasulle aiheuttaa hyvin vakavia palovammoja. (Encyclopedia Britannica [www-sivusto](#) 2021; Draffin & Bankes-Hughes 2013, 14; Fischer & Meech 2013, 162.)

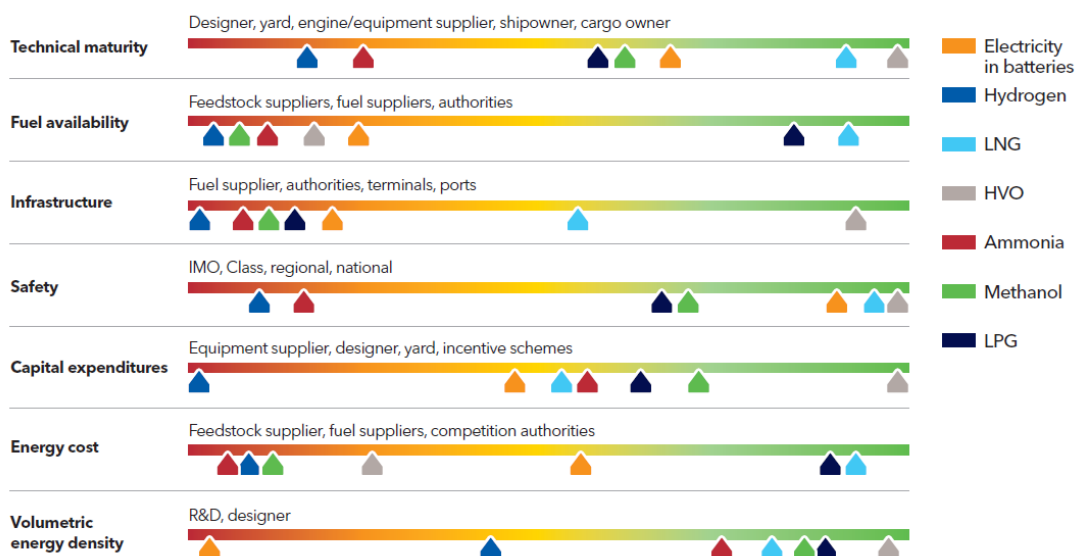
6.3 LNG tulevaisuudessa

Vaikka tällä hetkellä LNG on lähes kokonaisuudessaan fossiilista alkuperää, sitä on mahdollista tuottaa myös hiilineutraalisti. DNV:n tutkimuksessa nähdään mahdollisena niin biopohjaisen kuin synteettisesti ympäristöystävällisellä sähköllä valmistetun LNG:n käyttö hiilineutraalina polttoaineena. Tämä mahdollisuus on myös toteutuksessa. Wärtsilä ja Vantaan Energia Oy ovat solmineet esisopimuksen hiilineutraalista kaasuntuotantolaitoksesta, jonka on tarkoitus tuottaa synteettistä metaania kaupalliseen käyttöön jo vuonna 2025. Vaikkakin kyseisen laitoksen tuotetta ei välttämättä käytettäisikään laivapolttoaineena, on se silti merkittävä askel hiilineutraalin LNG:n tuotannossa. (Maritime forecast to 2050 2020, 13; Wärtsilä [www-sivusto](#) 2021.)

7 VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET

Tiukentuvien päästörajoitusten sekä fossiilisten polttoaineiden hinnannousun myötä vaihtoehtoisten polttoaineiden tutkimus on vauhdittunut viime vuosina. Alla käydään läpi todennäköisimpinä pidettyjä vaihtoehtoja fossiilisten polttoaineiden korvaajiksi.

The Alternative Fuel Barrier Dashboard - indicative status of key barriers for selected alternative fuels in 2020.



Technical maturity - refers to technical maturity level for engine technology and systems.

Fuel availability - refers to today's availability of the fuel, future production plans, and long-term availability.

Infrastructure - refers to available infrastructure for bunkering.

Safety - refers to rules and guidelines related to the design and safety requirements for the ship and onboard systems.

Capital expenditures - cost above baseline (conventional fuel-oil system) for LNG and carbon-neutral fuels, i.e. engine and fuel-system cost.

Energy cost - reflects fuel competitiveness compared with MGO, taking into account conversion efficiency.

Volumetric energy density - refers to amount of energy stored per volume unit compared with MGO, taking into account the volume of the storage solution.

HVO - hydrotreated vegetable oil;

LNG - liquefied natural gas;

LPG - liquefied petroleum gas;

Hydrogen - carbon-neutral liquefied hydrogen consumed in fuel cells;

Ammonia - carbon-neutral ammonia burned in internal combustion engines;

Electricity in batteries - full-electric with batteries;

Methanol - carbon-neutral methanol burned in internal combustion engines.

©DNV GL 2020

Kuva 7.1. DNV GL:n raportin näkemys vaihtoehtoisten polttoaineiden tilanteesta käyttöönoton esteiden kannalta. (Maritime Forecast to 2050 2020, 85.)

DNV pitää tutkimuksissaan todennäköisimpinä vaihtoehtoina uusiutuvaa dieseliä, metanolia, ammoniakkia ja vetyä. Myös uusiutuvista lähteistä valmistettu nesteytetty

maakaasu kuuluu vaihtoehtoihin, mutta valmistustapa ei vaikuta polttoaineen käytettävyyteen, joten sitä olisi turha käsitellä uudestaan tässä yhteydessä. Kuvassa 7.1 näkyvän kaavion mukaan DNV arvioi uusiutuvan dieselin ja metanolin olevan lähimpänä valmiutta laajaan käyttöönottoon, kun ammoniakki ja vety vaativat vielä merkittävästi lisää tutkimus- ja kehitystyötä ennen kuin ne ovat todellisia käytännön vaihtoehtoja. (DNV www-sivusto 2021; Maritime Forecast to 2050 2020, 85.)

Fuel type	LHV [MJ/kg]	Volumetric energy density [MJ/l]	Storage pressure [bar]	Storage temperature [°C]	Tank volume*
Liquefied Ammonia	19	12.7	1 or 10	-34 or 20	4.1
Liquefied Hydrogen	120	8.5	1	-253	7.6
Methanol	20	15.8	1	Ambient	2.3
Methane	50	23.4	1	-162	2.3
LPG	46	25.5	1	-42	2
MGO	43	36.6	1	Ambient	1
HFO	40	35	1	Ambient	1

Kuva 7.2. Eri polttoaineiden energiatiheyksien ja lämpöarvojen vertailua. (Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021, 32.)

7.1 Biodiesel ja uusiutuva diesel

Biodiesel on dieselin kaltainen kasvi- tai eläinrasvaperäinen polttoaine, jota nykyään käytetään pääasiassa sekoitettuna fossiilisen dieselin sekaan. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Biodieselillä voidaan tarkoittaa joko kaikkia biopohjaisia dieselin kaltaisia polttoaineita, tai nimenomaan FAME biodieseliä. Termi uusiutuva diesel on otettu sekaannusten välttämiseksi käyttöön puhuttaessa HVO-dieselistä, jota pidetään seuraavan sukupolven biodieselinä ja joka on lähes sellaisenaan käytettävissä fossiilisen dieselin tilalla. (Neste www-sivusto 2021.)

FAME:lla tarkoitetaan siis ensimmäisen sukupolven biodieseliä. Se on rasvahappojen metyyliesteri, FAME tulee sanoista Fatty Acid Methyl Esther. FAME valmistetaan

joko eläinrasvasta tai kasviöljystä esteröimällä. Lopputuote sekoitetaan fossiilisen dieselin sekaan, jotta polttoainestandardien vaatimukset saadaan täytettyä. FAME:n käyttöä on kuitenkin rajoitettu, ja nykyisessä ISO 8217 standardissa FAME:n maksimimääräksi on määritetty 7%. Tämä johtuu siitä, että FAME:lla on taipumus kerryttää vettä itseensä, ja se on erittäin hyvä ravinnonlähde mikrobeille, mikä edesauttaa mikrobikasvuston syntyä polttoainejärjestelmään. (Neste www-sivusto 2021; World Fuel Services www-sivusto 2021.)

Niin kutsuttu uusiutuva diesel (HVO - Hydrotreated Vegetable Oil) on koostumukseltaan hyvin samankaltaista kuin fossiilinen diesel. Nesteen valmistama HVO-diesel täyttää tiheyttä lukuunottamatta tällä hetkellä kaikki ISO 8217:2017 standardin vaatimukset. Näin ollen sitä voidaan käyttää suorana korvaajana (niin kutsuttu drop-in replacement) fossiilisille keskitisleille ilman suuria ja kalliita muutostöitä. (Neste www-sivusto 2021.)

Tällä hetkellä täysin biopohjaisia polttoöljyjä käytetään vielä hyvin pienessä mittakaavassa. Mainittavia esimerkkejä ovat Meriaura Groupin rahtilaivat M/S Mirva VG ja M/S Eeva VG, jotka käyttävät samaan konserniin kuuluvan VG EcoFuel Oy:n valmistamaa EcoFuel biopolttoöljyä. VG EcoFuel ei kerro polttoaineen tarkempia ominaisuuksia julkisuuteen muuten kuin sanomalla sen toimivan raskaan polttoöljyn tilalla suoraan, ja jatkojalostettuna kelpaavan myös fossilisten keskitisleiden korvaajaksi. (Meriaura Group www-sivusto 2021; VG EcoFuel www-sivusto 2021.)

7.2 Ammoniakki

Ammoniakki (NH_3) on viime aikoina saanut osakseen lisääntyvää huomiota yhtenä mahdollisena hiilineutraalina polttoaineena. Ammoniakkia käytetään jo nyt laajasti, erityisesti lannoiteteollisuuden raaka-aineena. Normaalissa ilmanpaineessa se on väritön, myrkyllinen kaasu, jolla on erittäin pistävä ominaishaju. (Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021, 9.)

Concentration / time	Effect
10000 ppm	Promptly lethal
5000 – 10000 ppm	Rapidly fatal
700 – 1700 ppm	Incapacitation from tearing of the eyes and coughing
500 ppm for 30 minutes	Upper respiratory tract irritation, tearing of the eyes
134 ppm for 5 minutes	Tearing of the eyes, eye irritation, nasal irritation, throat irritation, chest irritation
140 ppm for 2 hours	Severe irritation, need to leave the exposure area
100 ppm for 2 hours	Nuisance eye and throat irritation
50 – 80 ppm for 2 hours	Perceptible eye and throat
20 – 50 ppm	Mild discomfort, depending on whether an individual is accustomed to smelling ammonia

Kuva 7.2 Ammoniakin myrkyllisyys eri pitoisuuksina hengitysilmassa. (Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021, 15.)

Ammoniakin myrkyllisyys yhdistettynä kaasumaiseen olomuotoon muodostaa suuren haasteen ammoniakin käyttöturvallisuudelle. Kuten kuvasta 7.2 voidaan nähdä, ammoniakki on haitallista jo pieninäkin määrinä. Ammoniakki on myrkyllistä myös merieliöille, joten se vaatiikin nykyistä tarkempia turvallisuusjärjestelyjä riskien minimoimista varten. (Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021, 24.)

Nestemäisen ammoniakin tehollinen lämpöarvo on vain noin 19 MJ/kg, hieman alle puolet raskasöljyn lämpöarvosta. Edelleen ammoniakin energiatiheys tilavuuteensa nähden on vain 12,7 MJ/l, noin kolmannes raskasöljyn vastaavasta. Tämä tarkoittaa sitä, että ammoniakkiä on kuljetettava mukana huomattavasti enemmän kuin fossiilisia polttoaineita, tai polttoainetta on vaihtoehtoisesti bunkrattava useammin. (Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021, 32.)

Ammoniakkia käyttävät moottorit ovat pitkälti vasta kehitysvaiheessa, ja erityisesti ympäristöystävällisesti tuotettu ammoniakki hyvin kallista, mutta siitä huolimatta ammoniakkiä käyttäviä moottoreita on tulossa markkinoille jo lähivuosina. Peruseriaatteeltaan nämä koneet ovat kehitysversioita perinteisistä dieselmoottoreista, joten suurimmat muutokset ovatkin lähinnä polttoaineen syöttöjärjestelmissä. (Lassila 2021.)

7.3 Metanoli

Metanoli (CH_3OH) on yksinkertaisin alkoholi. Se on väritön, myrkyllinen, palava neste, jonka kiehumispiste on $64,96^\circ\text{C}$. Metanoli on tärkeä kemianteollisuuden raaka-aine, jota on aiemmin valmistettu puusta tislaamalla, mutta nykyään yleisimmät valmistustapa on vedyn ja häkäkaasun reaktio katalyytin avulla. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Metanolia pidetään potentiaalisena vaihtoehtona fossiilisille polttoaineille. Kuten kaikki tässä esitetyt vaihtoehtoiset polttoaineet, se on rikitöntä, ja sen tuottamat hiukkas- ja typenoksidipäästöt ovat myös hyvin alhaiset. Koska se on tärkeä raaka-aine kemianteollisuudelle, sitä on jo nyt erittäin helposti saatavilla kemikaalisatamissa ympäri maailman. (Ellis & Tanneberger 2016, 2.)

Metanolia käyttämällä on mahdollista päästä myös erittäin paljon pienempiin kasvihuonekaasupäästöihin, metanolin valmistustavasta riippuen. Maakaasusta valmistetun metanolin kasvihuonekaasupäästöt ovat likimain samalla tasolla fossiilisen kaasuöljyn kanssa, mutta jätteistä valmistettuna metanolin kasvihuonekaasupäästöt ovat laskennallisesti lähellä nollaa. (Ellis & Tanneberger 2016, 41.)

Metanolin huonoina puolina voidaan pitää sen myrkyllisyyttä sekä huonoa lämpöarvoa. Metanoli on erittäin myrkyllistä paitsi nieltynä, myös hengitettynä. Höyryille altistuminen aiheuttaa huumausta, keskushermoston oireita tai näköhäiriöitä, jotka voivat olla pysyviä. Pahimmillaan metanolimyrkytys aiheuttaa pysyvän sokeuden tai jopa kuoleman. Metanolihöyryä ei tarvitse olla hengitysilmassa enempää kuin noin 66000 mg/m^3 ollakseen tappavaa. Suun kautta nautittuna jopa 15 ml annos 40% vahvuista metanoliliuosta on aiheuttanut kuoleman. Näin ollen metanolia käsiteltäessä turvatoimien tulee olla erityisen tarkat. (Työterveyslaitos www-sivusto 2021.)

Huonon lämpöarvonsa takia metanolin kulutus on selvästi suurempaa kuin fossiilisten polttoaineiden. Verrattuna raskaan polttoöljyn lämpöarvoon 40 MJ/kg , metanolin vastaava on vain 20 MJ/kg . Näin ollen yhtä pitkän toimintasäteen saamiseksi metanolia täytyy olla mukana noin kaksinkertainen määrä. Tämä taas on pois laivan lastitilan koosta, tai sitten bunkrauksia on suunniteltava huomattavasti tiheimmin. Tämä taas

tarkoittaa sitä, että erittäin myrkyllistä ainetta on käsiteltävä usein. (Ellis & Tanneberger 2016, 27.)

Metanolikäyttöisiä laivoja on maailmassa jo muutamia. Ensimmäisenä metanoli pääkoneen polttoaineena otettiin käyttöön M/V Stena Germanicalla vuonna 2015. Sitten Waterfront Shipping on ottanut käyttöön 11 metanolia polttavaa kemikaalitankkeria. Useita tutkimusprojekteja aiheesta on myös käynnissä. (Ellis & Tanneberger 2016, 19; Waterfront Shipping www-sivusto 2021.)

7.4 Vety

Vety (H_2) on väritön, hajuton ja mauton erittäin tulenarka kaasu. Se on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, mutta esiintyy luonnossa erittäin harvoin puhtaana vetynä. Sen sijaan erityisesti orgaanisissa yhdisteissä sitä on runsaasti, ja hapen kanssa vety muodostaa vettä. (Encyclopedia Britannica www-sivusto 2021.)

Tähän päivään mennessä ainoa merkittävä käyttö vedyllä tutkimusprojektien lisäksi on saksalaisissa Tyyppi 212A ja 214 -sukellusveneissä, joiden ilmakehästä riippumaton AIP-koneisto (sanoista Air Independent Propulsion) saa käyttövoimansa vetyä polttavasta polttokennosta. (Thyssenkrupp Marine Systems www-sivusto 2021.)

Vedyn käyttöä kuitenkin tutkitaan jatkuvasti, ja esimerkiksi Wärtsilä aikookin saada vetyä käyttävän moottorin markkinoille jo vuoteen 2025 mennessä. Vetyä käytetään jo paljon teollisuuden raaka-aineena, joten tuotantokapasiteettiakin on. Suurin ongelma ympäristön kannalta on vedyn tuotantotapa. Se tuotetaan nykypäivänä lähinnä maakaasusta, jolloin tuotannosta vapautuu merkittäviä määriä hiilidioksidia ilmakehään. Toisaalta vedyn tuotanto ympäristöystävällisesti elektrolyysin avulla on erittäin energiaintensiivistä, ja esimerkiksi Suomessa tällä hetkellä käytettävän vedyn tuottaminen päästöttömästi vaatisi lähes koko Suomen tämänhetkisen tuulivoimatuotannon valjastamisen pelkkään vedyn tuotantoon. (Lassila 2021.)

Suurin haaste vedyn käytölle on edelleen sen varastointi. Vaikka vedyn lämpöarvo on lähes kolminkertainen öljyyn nähden, tilanne muuttuu päinvastaiseksi, kun tarkastellaan vedyn vaatimaa säiliötilavuutta. Vety on nestemäisessäkin muodossaan erittäin matalatiheyksistä, joten säiliöiden tarvitsee olla suuria. Lisäksi nestemäinen vety vaatii vielä LNG:täkin selvästi matalamman lämpötilan (-253°C), joten säiliön lämpöeristys on erityisen vaativaa toteuttaa. Toisaalta vety voidaan ruiskuttaa moottoriin hyvin kylmänä, jolloin se laskee polttotapahtuman lämpötilaa. Tämä puolestaan parantaa moottorin hyötysuhdetta ja laskee typen oksidien päästöjä. (Encyclopedia Britannica [www-sivusto](http://www.sivusto) 2021; Srivastava & Hancsó 2014, 152.)

Vetyä voidaan myös varastoida hydridimuodossa. Vetykaasulla on taipumus adsorboitua metalleihin, mitä hyväksikäyttämällä vetyä voidaan varastoida ilman suuria eristys- ja painevaatimuksia. Huonona puolena tämä säilytystapa vaatii suuren massan, fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna rautahydridisäiliö painaa yli 25-kertaisesti enemmän. (Srivastava & Hancsó 2014, 158.)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Kuten muillakin liikenteen osa-alueilla, myös merenkulussa fossiiliset polttoaineet ovat pitkään olleet lähes ainoana käytettävänä energian lähteenä. Öljy on ollut hyvä ja edullinen polttoaine, ja sitä on ollut saatavissa kaikkialla ympäri maailman. Päästöjen ongelmallisuutta lukuun ottamatta öljy on edelleen ihanteellinen energianlähde laivoille. Ilmastonmuutoksen myötä suhtautuminen öljyyn polttoaineena on kuitenkin muuttumassa radikaalisti, ja onkin luultavaa, että lähivuosikymmenten aikana muut polttoaineet vievät öljyltä sen nykyisen valta-aseman.

Laivapolttoaineiden kehitys on pitkään edennyt lähinnä kustannustekijöiden ohjajamana. IMO:n rajoitukset polttoaineiden rikkipitoisuudelle kuitenkin muuttivat kehityksen painopistettä hieman, ja viimeistään ilmastonmuutoksen torjuntaan tähtäävien toimenpiteiden myötä myös kasvihuonekaasupäästöihin on alettu kiinnittää entistä enemmän huomiota. Näiden painotusten myötä onkin helppo ajatella, että fossiilisten polttoaineiden aikakausi alkaa olla loppuillaan.

Samaan aikaan merenkulku on kuitenkin erittäin voimakkaasti kilpailtu ala, eikä varustamoilla ole intoa kuluttaa rahaa enempää kuin on pakko. Nykypäivän yritysmaailmassa, jossa voiton maksimointi on selvä prioriteetti, kehitystyötä ei tehdä pelkästään kehitystyön ilosta, vaan sille on oltava selvä syy. Tämä syy voi olla fossiilisten polttoaineiden kallistuminen, IMO:n, EU:n tai muiden vastaavien järjestöiden säätely, tai sitten julkisuuden aiheuttama paine varustamojen imagolle.

Polttoaineiden kehitys vie varustamot tavallaan takaisin siihen aikaan, jolloin öljy alkoi nousta kivihiilen korvaajaksi. Vanha, tunnettu ja edullinen teknologia kohtaa uuden haastajan, joka vaatii aivan uudenlaista osaamista niin merimiehiltä kuin varustamon maahenkilökunnaltakin. Aiempaan tilanteeseen verrattuna tämänhetkinen ympäristö on toki vielä monimutkaisempi, sillä varustamojen pitäisi pystyä ennustamaan, mikä polttoaine lopulta muodostuu kokonaisuudeltaan edullisimmaksi käyttäen. Tähän kysymykseen ei välttämättä universaalia oikeaa vastausta olekaan, käyttökohteiden vaatimusten vaihdellessa voimakkaasti.

LÄHTEET

Alakangas E., Hurskainen M., Laatikainen-Luntama J. & Korhonen J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia, Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.

Cames M., Wissner N. & Sutter J. 2021. Ammonia as a marine fuel, Berliini: Öko-insitut. Viitattu 13.7.2021. <https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-study-ammonia-marine-fuel.pdf>

DNV www-sivusto. Viitattu 13.7.2021. www.dnv.com

Draffin, N. & Bankes-Hughes L. 2013. An Introduction to LNG Bunkering, Petrosport. Viitattu 20.7.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/detail.action?docID=3385451>

Ellis J. & Tanneberger K. 2016. Study on the use of ethy and methyl alcohol as alternative fuels in shipping, Göteborg: SSPA. Viitattu 12.7.2021. <http://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/2726-study-on-the-use-of-ethyl-and-methyl-alcohol-as-alternative-fuels-in-shipping.html>

Encyclopedia Britannica www-sivusto. Viitattu 28.4.2021. www.britannica.com

Fisher C. & Meech R. 2013. Bunkers: An Analysis of the Technical and Environmental Impact Issues, Oxfordshire: Petrosport. Viitattu 28.4.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/reader.action?docID=3385450>

Future Ship Powering Options. 2013. Lontoo: Royal Academy of Engineering. Viitattu 10.7.2021. <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/future-ship-powering-options>

Harrison T., Bankes-Hughes L. & Cutler A. 2011. Legal Issues in Bunkering: An Introduction to the Law Relating to Sale and Use of Marine Fuels, Oxfordshire: Petro-spot. Viitattu 4.5.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/reader.action?docID=3385445&query=legal+issues+to+bunkering>

Häkkinen, P. 1993. Laivan koneistot, Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu.

International Maritime Organization www-sivusto. Viitattu 29.4.2021. www.imo.org

ISO www-sivusto. Viitattu 29.4.2021. www.iso.org

Kananen, J. 2015. Opinnäytetyön kirjoittajan opas, Jyväskylä: JAMK

Lassila, A. 2021. Wärtsilä aikoo saada vetymootorit myyntiin... 14.7.2021. Viitattu 28.8.2021. <https://www.hs.fi/talous/art-2000008125291.html>

MAN Energy Solutions www-sivusto. Viitattu 28.6.2021. www.man-es.com

Marine fuels and hydrogen sulphide. 2013. Brussels: Concawe. Viitattu 3.5.2021. https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/rpt_13-8-2013-02451-01-e.pdf

marineinsight.com sivusto. Viitattu 27.4.2021. www.marineinsight.com

Maritime Forecast to 2050. 2020. DNV GL. Viitattu 11.7.2021. <https://eto.dnv.com/2020/Maritime/forecast>

MeriAura Group www-sivusto. Viitattu 11.7.2021. www.meriaura.fi

Neste www-sivusto. Viitattu 6.5.2021. www.neste.com

Richards, P. & Coley, T. 2005. Automotive Fuels Reference Book – Third Edition, SAE International. Viitattu 6.5.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/reader.action?docID=5341890>

Ship & Bunker www-sivusto. Viitattu 18.5.2021. shipandbunker.com

Srivastava, S. P. & Hancsók, J. 2014. Fuels and Fuel-Additives, USA: John Wiley & Sons. Viitattu 18.5.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/reader.action?docID=1598818>

steamboats.com sivusto. Viitattu 21.4.2021. www.steamboats.com

Stout, S. & Wang, Z. 2016. Standard Handbook Oil Spill Environmental Forensics: Fingerprinting and Source Identification, Lontoo: Elsevier Science & Technology Publishing

Studies on the Feasibility and Use of LNG as a Fuel for Shipping. 2016. Lontoo: International Maritime Organization. Viitattu 4.7.2021. <https://wwwcdn.imo.org/local-resources/en/OurWork/Environment/Documents/LNG%20Study.pdf>

Thyssenkrupp Marine Systems www-sivusto. Viitattu 4.7.2021. www.thyssenkrupp-marinesystems.com

Työterveyslaitos www-sivusto. Viitattu 25.9.2021. www.ttl.fi

VG EcoFuel www-sivusto. Viitattu 11.7.2021. www.vgecofuel.fi

Waterfront Shipping www-sivusto. Viitattu 12.7.2021. <https://wfs-cl.com/>

Wilhelmsen Ships Service www-sivusto. Viitattu 28.6.2021. www.wilhelmsen.com

Woodyard, D. & Latache, M. 2009. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines, Oxford (UK): Butterworth-Heinemann. Viitattu 10.5.2021. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/samk/reader.action?docID=535300>

World Fuel Services www-sivusto. Viitattu 29.4.2021. www.wfscorp.com

