

Opinnäytetyö (AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2020

Santtu Vuori

LNG-JÄRJESTELMÄ RISTEILYALUKSESSA

– Nesteytetty maakaasu risteilyaluksen
polttoaineena

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2020 | 60 sivua, 1 liitesivu

Santtu Vuori

LNG-JÄRJESTELMÄ RISTEILYALUKSESSA

– Nesteytetty maakaasu merenkulun polttoaineena

Opinnäytetyön aiheena oli tehdä kirjallisuuskatsaus nesteytettyä maakaasua käyttävän risteilyaluksen polttoainejärjestelmään. Tavoitteena oli tehdä ytimekäs tiivistelmä nesteytetyn maakaasun ominaisuuksista, turvallisesta käsittelystä ja polttoainejärjestelmään sisältyvistä laitteista. Aihe on ajankohtainen, sillä nesteytetyn maakaasun osuus meriliikenteen polttoaineista on kasvamassa jatkuvasti.

Opinnäytetyön alussa vertaillaan maakaasun ja perinteisempien polttoaineiden, kuten raskaan polttoöljyn, ominaisuuksia keskenään. Tarkoituksena oli etsiä syitä nesteytetyn maakaasun suosioon. Työssä sivutaan myös aiheeseen liittyviä standardeja ja tahoja, jotka asettavat rajoja järjestelmälle turvallisuuden näkökulmasta. Työssä käsitellään nesteytetyn maakaasun varastointiin ja käsittelyyn liittyviä riskejä ja esitellään toimintatapoja, joilla näitä riskejä voidaan minimoida. On tärkeää, että kaikki nesteytetyn maakaasun kanssa tekemisissä olevat henkilöt tiedostavat nesteytetyn maakaasun luonteen ja sen miten toimia turvallisesti kaasun kanssa. Työn loppupuolella käydään läpi järjestelmän keskeisimmät laitteet ja tuodaan ilmi määräysten asettamia vaatimuksia laitteistolle.

Lopputuloksena syntyi tiivistelmä nesteytetyn maakaasun käytöstä polttoaineena. Tiivistelmä on hyödyllinen kaikille, jotka ovat kiinnostuneita nesteytetystä maakaasusta ja meriliikenteen polttoaineiden kehityksestä.

ASIASANAT:

maakaasu, meriliikenne, nesteytetty maakaasu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive Engineering

2020 | 60 pages, 1 appendice

Santtu Vuori

THE LNG-SYSTEM IN A CRUISE SHIP

– liquefied natural gas as a marine fuel

The subject of this thesis was to compile a literature review of the fuel system of a cruise ship using liquefied natural gas. The aim was to provide a concise summary that includes the characteristics of liquefied natural gas, safe handling of liquefied natural gas and the main equipment of the fuel system. The topic is current because the share of liquefied natural gas in marine fuels is constantly increasing.

The thesis begins by comparing the properties of natural gas with those of more traditional fuels such as heavy fuel oil. The purpose was to look for reasons for popularity of liquefied natural gas. The thesis also deals with relevant standards and parties that set boundaries for the system from the safety perspective. The risks of storing and handling liquefied natural gas are discussed in the next part of this thesis. The thesis also provides ways to reduce these risks. It is important that everyone who deals with liquefied natural gas is familiar with the nature of liquefied natural gas and knows how to handle it safely. In the end of this thesis the most important equipments of the system are reviewed and requirements for the equipment are discussed.

The end result was a summary of the use of liquefied natural gas as a fuel. This summary is useful for anyone who has interest in liquefied natural gas or interest in the development of marine fuels.

KEYWORDS:

liquefied natural gas, marine traffic, natural gas

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	7
1 JOHDANTO	8
2 MAAKAASU	9
2.1 Biokaasu	16
2.2 CNG	17
2.3 LNG	18
2.3.1 Maakaasun nesteyttäminen	20
2.3.2 LNG:n kuljetus	21
2.3.3 LNG hinta	21
3 ASETUKSET JA STANDARDIT	23
3.1 IMO	23
3.1.1 SOLAS	24
3.1.2 IGF-koodi	24
3.1.3 IGC-koodi	24
3.1.4 STCW	25
3.1.5 MARPOL	25
3.2 MED	27
3.3 Luokituslaitokset	28
3.4 Keskeisimmät standardit ja ohjeistukset	28
4 RISKIT JA NIIDEN HALLINTA	30
4.1 Boil-off-kaasun hallinta	30
4.2 Nesteytetyn maakaasun vuodot	31
4.3 Järjestelmän paineenrajoitusventtiilit	31
4.4 Räjähdyksvaaralliset tilat	32
4.5 Rollover	33
4.6 RPT	34
4.7 Paleltumat	34
4.8 Materiaalin haurastuminen ja lämpölaajuminen	34
4.9 BLEVE	35
4.10 Tulipalo	36
4.11 Hapeton tila	37

5 LAITTEISTO	38
5.1 Tankit	39
5.1.1 A-tyyppin tankki	39
5.1.2 B-tyyppin tankki	40
5.1.3 C-tyyppin tankki	40
5.1.4 Membraanitankki	40
5.2 Höyrystin ja polttoaineen lämmitin	41
5.3 Moottori ja kaasunsyöttöyksikkö	42
5.3.1 Kipinäsytytteinen moottori	42
5.3.2 Dieselsytytteinen matalapainemoottori	43
5.3.3 Dieselsytytteinen korkeapainemoottori	43
5.3.4 Kaasunsyöttöyksikkö	45
5.4 Konehuoneen luokittelu	45
5.5 Ilmalukot	45
5.6 Typpigeneraattori	46
5.7 Maakaasuputkisto	46
5.8 Polttokenno	47
5.9 Boil-off-kaasun kompressori	47
5.10 Höyrykattila	48
5.11 Kaasunilmaisimet	49
5.12 Ilmanvaihto	49
6 JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO	51
6.1 Laiturikokeet	51
6.2 Järjestelmän kuivaus ja jäähdytys	51
6.3 Bunkraus	52
6.3.1 Säiliöautosta alukseen bunkraus (TTS)	53
6.3.2 Aluksesta alukseen bunkraus (STS)	53
6.3.3 Terminaalista alukseen bunkraus (PTS)	54
7 YHTEENVETO	55
LÄHTEET	57

LIITTEET

Liite 1. Keskeisimpiä standardeja ja ohjeistuksia LNG-alukselle

KAAVAT

Kaava 1. Energiatiheys lämpöarvosta ja tiheydestä (kg).	11
Kaava 2. Energiatiheys lämpöarvosta ja tiheydestä (m ³).	12

KUVAT

Kuva 1. Polttoaineiden energiatiheyden vertailu	12
Kuva 2. Päästökонтроloidut alueet (DNV GL 2019b)	26
Kuva 3. Ruorimerkki (2014/90/EU).	28
Kuva 4. Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen transitiokäyrät (EIGA 2018, 5)	35
Kuva 5. Yksinkertaistettu kuva LNG-järjestelmästä	38
Kuva 6. Seoksen ja tehollisen keskipaineen vaikutus NOx- päästöihin ja nakutusrajaan (Bakas 2015).	42
Kuva 7. Paineen vaikutus maakaasun kiehumispisteeseen (Ligterink 2013)	48

KUVIOT

Kuvio 1. Yhdyskuntajätteen käsittely (Suomen virallinen tilasto 2019)	16
Kuvio 2. LNG alukset tyypeittäin (DNV 2019, Safety4Sea 2019 mukaan)	20

TAULUKOT

Taulukko 1. Esimerkkejä maakaasun koostumuksesta (Suomen Kaasuyhdistys ry 2014, 6).	9
Taulukko 2. Maakaasun vaatimuksia (SFS-EN 16726).	10
Taulukko 3. Polttoaineiden lämpöarvojen vertailu (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 7).	11
Taulukko 4. Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 9–10).	13
Taulukko 5. Esimerkkejä LNG koostumuksesta ja ominaisuuksista (SFS-EN ISO 16903:2015, 3).	19
Taulukko 6. Polttoaineiden hintoja lokakuussa 2019 (DNV GL 2019a).	22
Taulukko 7. Typen oksidien päästörajat (IMO 2019e)	27
Taulukko 8. Keskeisiä standardeja ja ohjeistuksia LNG-alukselle.	29
Taulukko 9. LNG-tankin eristystapoja (Kraack 2015).	39
Taulukko 10. Moottoreiden vertailua (Bakas 2015, Jääskeläinen 2019).	44

KÄYTETYT LYHENTEET

BLEVE	Boiling Liquid Expansion Vapour Explosion
CNG	Compressed natural gas
ECA	Emission Controlled Area
ERS	Emergency Release System
ESD	Emergency Shutdown System
FSHS	Fuel Storage Hold Space
GVU	Gas Valve Unit
GWP	Global Warming Potential
IGC	International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IGF	International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels
IMO	International Maritime Organization
LNG	Liquefied natural gas
LT	Low Temperature, viileämpi moottorin jäähdytysvesi
MARPOL	International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships
MDO	Marine Diesel Oil
MSC	Maritime Safety Committee
RPT	Rapid Phase Transition
STCW	Standards of Training, Certification and Watchkeeping for seafarers
TCS	Tank Connection Space

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä käsitellään nykyaikaista LNG-järjestelmää risteilyaluksessa. Kii-ristyvät päästörajoitukset ja yleinen asenne ympäristöön ja ilmastonmuutokseen ovat ajaneet laivavarustamot harkitsemaan vaihtoehtoisia polttoaineita perinteisen raskaan polttoöljyn sijaan. Maakaasulla päästään IMO:n asettamiin typen oksidien ja rikin pää-
störajoihin. Maakaasun poltosta muodostuvat hiilidioksidipäästöt ovat noin 25 % pienem-
mät kuin raskaan polttoöljyn poltosta muodostuvat. Lisäksi maakaasun poltosta muodos-
tuu huomattavasti vähemmän pienhiukkaspäästöjä kuin raskaan polttoöljyn poltosta. LNG:tä pääpolttoaineenaan käyttävät alukset ovatkin lisääntyneet reilusti viime vuosina ,ja LNG näyttääkin kasvattavansa asemansa suosituimpana polttoaineena uusissa me-
riliikenteen aluksissa.

Opinnäytetyö on toteutettu yhteistyössä Meyer Turun kanssa. Opinnäytetyön tiimoilta on tutustuttu Costa Smeraldan LNG-järjestelmään. Syksyllä 2019 luovutettu Costa Sme-
ralda on toinen risteilyalus maailmassa, joka käyttää LNG:tä polttoaineenaan. Costa Smeralda on Carnival Corporation PLC:n tytäryhtiön Costa Crocieren tilaama ristei-
lyalus. Telakan tilauskirja ulottuu tällä hetkellä vuoteen 2025, ja kaikki seuraavat kuusi risteilyalusta tulevat olemaan LNG-käyttöisiä. Näistä kaksi menevät Carnival Cruise Li-
nesille, yksi Costa Crocierelle ja kolme Royal Caribbeanille. Royal Caribbeanin tilaamiin ICON-risteilyaluksiin tulee lisäksi vielä polttokennojärjestelmä.

Opinnäytetyön tarkoituksena on tarkastella nykyaikaista LNG-järjestelmää ja tehdä suo-
menkielinen ytimekäs tietopaketti nesteytetystä maakaasusta, polttoaineen turvallisesta
käsittelystä ja vaadittavasta laitteistosta. Työssä sivutaan myös aiheeseen liittyviä stan-
dardeja ja pohditaan laivapolttoaineiden tulevaisuuden näkymiä. Aiheesta löytyy vieras-
kielisena runsaasti tietoa, mutta varsinkaan kovin yksityiskohtaista tietoa ei suomen kie-
lellä ole saatavana.

Opinnäytetyöstä saa hyvän käsityksen syistä, minkä takia LNG:n käyttö on suosittua ny-
kypäivänä ja minkälaisia riskejä LNG:hen liittyy. Aihe on erittäin laaja, joten kaikkia aihe-
alueita ei tässä työssä käsitellä kovinkaan yksityiskohtaisesti.

2 MAAKAASU

Maakaasu on fossiilinen polttoaine ja kaikista vähiten saastuttava sellainen. Maakaasu on luonnostaan hajuton ja väritön kaasu. Palaessaan se tuottaa pääosin vain vettä, hiilidioksidia ja pienen määrän typen oksideja. Maakaasua on käytetty energialähteenä jo vuodesta 1816, jolloin sillä on valaistu katuja Yhdysvaltojen Baltimoressa. Nykypäivänä maakaasulla lämmitetään taloja, tuotetaan sähköä ja liikutetaan ajoneuvoja liikenteessä. (AGA 2019a.)

Maakaasun sisältämät komponentit vaihtelevat paljonkin riippuen tuotantolähteestä. Pääkomponentti on kuitenkin aina metaani. Metaani on kaikista yksinkertaisin hiilivety, ja se koostuu yhdestä hiiliatomista ja neljästä vetyatomista. Maakaasun metaanipitoisuus vaihtelee yleisesti 81,3 prosentin ja 98 prosentin välillä. Metaanin lisäksi maakaasussa on yleensä etaania 0,8 prosentista 6,7 prosenttiin. Propaanipitoisuus maakaasussa jää yleisesti alle 0,5 prosentin. Edellä mainittujen lisäksi maakaasu sisältää pienenä pitoisuuksina muun muassa typpeä ja hiilidioksidia. (Suomen Kaasuyhdistys ry 2014, 6.)

Taulukko 1. Esimerkkejä maakaasun koostumuksesta (Suomen Kaasuyhdistys ry 2014, 6).

Kenttä	Venäjä	Saksa	USA	Hollanti	Norja
	Urengoi	Goldenstedt	Kansas	Groningen	Troll
Metaani	98 %	88,0 %	84,1 %	81,3 %	93,2 %
Etaani	0,8 %	1,0 %	6,7 %	2,8 %	3,7 %
Propaani	0,2 %	0,2 %	0,3 %	0,4 %	0,4 %
Butaani	0,02 %	-	-	0,4 %	0,5 %
Typpi	0,9 %	10,0 %	8,4 %	14,3 %	1,6 %
Hiilidioksidi	0,1 %	0,8 %	0,8 %	0,9 %	0,6 %

Jos kaasun metaanipitoisuus on alhainen tai se sisältää epätoivottuja komponentteja, esimerkiksi rikkiä, täytyy kaasu jalostaa ennen markkinoille saattamista. Jalostamalla

varmistetaan, että polttoaineena käytettävä maakaasu vastaa laatuvaatimuksia. Euroopalainen EN 16726 -standardi määrittelee maakaasun laatuvaatimukset (ks. Taulukko 2).

Taulukko 2. Maakaasun vaatimuksia (SFS-EN 16726).

	Yksikkö	Raja-arvot standardi vertailuolosuhteissa (15 °C/15 °C)	
		Min.	Max.
Suhteellinen tiheys	-	0,555	0,700
Kokonaisuudessaan rikkiä ilman hajustetta	mg/m ³	-	20
Rikkivedyt + karbonyylisulfidi (rikinä)	mg/m ³	-	5
Tiolit ilman hajustetta (rikinä)	mg/m ³	-	6
Happi	mol/mol	-	0,001 %*
Hiilidioksidi	mol/mol	-	2,5 %*
Metaaniluku	-	65	-
*Tietyissä tilanteissa pitoisuus voi olla suurempikin ks. SFS-EN 16726 HUOM! Taulukko ei sisällä kaikkia standardin mukaisia maakaasun vaatimuksia.			

Lämpöarvo kertoo, kuinka paljon lämpöenergiaa aine tuottaa palaessaan täydellisesti eli käytännössä kuinka tehokkaasti polttoaine lämmittää. Lämpöarvo voidaan ilmoittaa joko kalorimetrisenä, toisin sanoen ylempänä lämpöarvona, tai tehollisena lämpöarvona eli alempana lämpöarvona. Ylemmän lämpöarvon määrittämisessä on otettu mukaan palamisen aikana höyrystyvän veden höyrystymisenergia. Alempi lämpöarvo voidaan laskea ylempästä lämpöarvosta vähentämällä siitä palamisen yhteydessä syntyneen veden haihtumisenergia. (Kuokkanen ym. 2019.) Maakaasun ja perinteisempien polttoaineiden eli kevyen ja raskaan polttoöljyn lämpöarvojen vertailu löytyy taulukosta 3.

Taulukko 3. Polttoaineiden lämpöarvojen vertailu (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 7).

		Maakaasu	Propani	Kevyt polttoöljy	Raskas polttoöljy
Tiheys		0,72 kg/m³	2,01 kg/m³	0,85 kg/dm³	0,96 kg/dm³
Ylempi lämpöarvo (kalorimetrinen)	MJ/m ³ n	39,8	101,2		
	MJ/kg	55,3	50,3	44,6	44,4
	MJ/dm ³	24,2 (LNG)			42,6
Tehollinen lämpöarvo	MJ/m ³ n	36,0	93,0		
	MJ/kg	50,0	46,0	42,7	40,6
	kWh/kg	13,9	12,8	11,8	11,3
	kWh/m ³ n	10,0	28,8		

Polttoaineiden energiasisällöstä puhuttaessa käytetään yleisesti lämpöarvoa (MJ/kg). Kuitenkin, kun vertaillaan nesteytettyä maakaasua ja polttoöljyä polttoaineena, olisi hyvä käyttää tilavuuteen perustuvaa energiatiheyttä (MJ/L).

Vertaillaan seuraavaksi nesteytetyn maakaasun ja raskaan polttoöljyn energiatiheyyksiä. Ensin täytyy laskea aineiden energiatihedet ja tähän käytetään ylempää lämpöarvoa ja aineen tiheyttä. Raskaan polttoöljyn tiheys on 0,96 kg/l ja kalorimetrinen lämpöarvo on 44,4 MJ/kg (taulukko 3.) Energiatiheys saadaan kertomalla polttoaineen tiheys lämpöarvolla (kaava 1).

$$\frac{kg}{l} * \frac{MJ}{kg} = \frac{MJ}{l}$$

Kaava 1. Energiatiheys lämpöarvosta ja tiheydestä (kg).

Kaavaa 1 käyttämällä saadaan raskaan polttoöljyn energiatihedeksi 42,62 MJ/l.

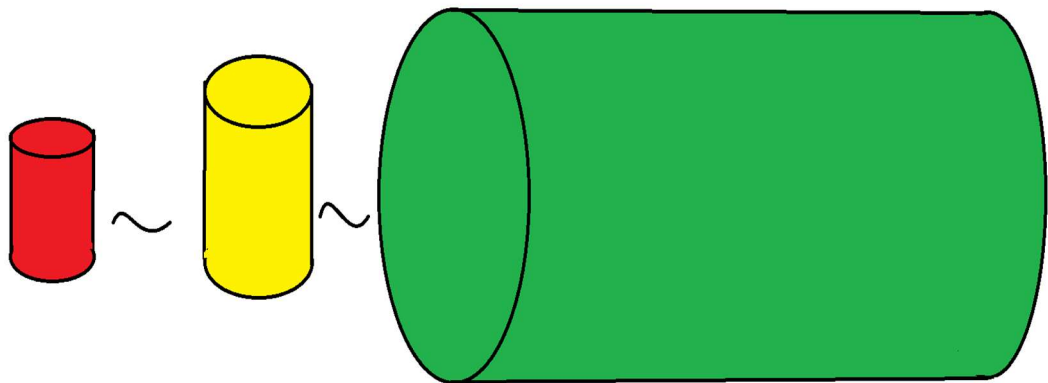
Taulukosta 5 käytetään esimerkin 3 mukaista nesteytettyä maakaasua. LNG:n tiheys on $468,7 \text{ kg/m}^3$ ja kaasun kalorimetrinen lämpöarvo on $42,59 \text{ MJ/m}^3$. Lisäksi tarvitaan tieto, kuinka paljon kilogrammasta LNG:tä saadaan höyrystettyä kaasua. Kaasun tilavuus per kilogramma LNG:tä on $1,211 \text{ m}^3/\text{kg}$ (taulukko 5).

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} * \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3}$$

Kaava 2. Energiatiheys lämpöarvosta ja tiheydestä (m^3).

Kaavaa 2 käyttämällä saadaan nesteytetyn maakaasun energiatiheydeksi $24173,90 \text{ MJ/m}^3$. Tämä kun jaetaan vielä tuhannella, saadaan energiatiheydeksi $24,17 \text{ MJ/l}$.

Karkeasti sanottuna raskaan polttoöljyn energiatiheys on siis noin 1,7-kertainen verrattuna LNG:hen (ks kuva 1).



1L HFO \approx 1,7L LNG \approx 4,3L CNG (200bar)

Kuva 1. Polttoaineiden energiatiheyden vertailu

Maakaasun syttymisherkkyttä kuvaa metaaniluku. Metaaniluku voidaan määrittää koemootorissa ja verrata polttoaineen nakutuskestävyyttä vedyn kanssa sekoitetun metaanin nakutuskestävyyteen (vrt. oktaaniluku). Metaaniluku 100 vastaa nakutuskestävyydeltään 100 % metaania ja metaaniluku 0 vastaa 100 % vetyä (GIE 2012, 1). Metaaniluku voidaan myös arvioida laskemalla. Alhainen metaaniluku tarkoittaa, että polttoaine on syttymisherkkää ja näin ollen altis nakutukselle. Esimerkiksi Wärtsilän 46DF-konemanuaalissa pienin sallittu metaaniluku on 60. (Wärtsilä 2019c, 6.1.) Typen ja hiilidioksidin määrä maakaasussa nostaa metaanilukua, sillä ne eivät ole herkästi palavia kaasuja, ja

raskaammat hiilivedyt, kuten propaani ja butaani, taas laskevat metaanilukua. Taulukosta 4 käy ilmi metaanin, propaanin ja butaanin itsesyttymislämpötilojen erot.

Taulukko 4. Kaasumaisten polttoaineiden ominaisuuksia (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 9–10).

	Metaani	Propaani	Butaani
Molekyylikaava	CH₄	C₃H₈	C₄H₁₀
Molekyylipaino, kg/mol	16,04	44,09	58,12
Tiheys, kg/m ³ n (kaasumaisena)	0,72	2,01	2,70
Suhteellinen tiheys kaasumaisena (ilma 1,293 kg/m ³ n)	0,56	1,56	2,08
Kiehumispiste (atm), °C	-161,5	-42,1	-0,5
Tehollinen lämpöarvo, kWh/m ³	10,0	26,0	34,1
kWh/kg	13,9	12,8	12,7
MJ/m ³ n	36,0	93,6	122,8
MJ/kg	50,0	46,3	45,7
Syttymisrajat, til-% kaasua ilmassa (20 °C)	5–15	2,1–9,3	1,8–8,4
Syttymislämpötila, °C	650	510	490
Wobbe-arvo (tehollinen), MJ/m ³ n	47,6	75,0	85,8
Teoreettinen palamislämpötila ilmassa, °C (Lambda = 1,0)	1 915	1 925	1 900
Palamisnopeus ilmassa, cm/s	41	45	42
Palamisilman tarve (Lambda = 1,0), m ³ n/m ³ n kaasua	9,6	24,3	32,0

Wobbe-arvo on laskennallinen arvo, joka voidaan laskea energiakaasuista niiden lämpöarvon ja tiheyden perusteella. Wobbe-arvon perusteella voidaan energiakaasut jaotella kolmeen eri ryhmään. Samassa kaasulaitteessa voidaan polttaa vain samaan ryhmään kuuluvia kaasuja ilman muutoksia järjestelmän suuttimiin ja paineensäätimiin.

Maakaasut kuuluvat toiseen kaasuryhmään Wobbe-arvonsa perusteella. Toinen kaasuryhmä on vielä jaettu kolmeen alaryhmään. Alaryhmät ovat H, L ja E. Suomessa käytetty maakaasu sijoittuu alaryhmään H eli korkean lämpöarvon maakaasuihin. (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 8.) Taulukossa 4 vertaillaan eri kaasujen Wobbe-arvoja.

Miljoonien vuosien saatossa on kuolleista eliöistä tai tarkemmin sanottuna niiden sisältämästä hiilestä ja vedystä, syntynyt maaperään kovan lämmön ja paineen avulla kivihiiltä, öljyä ja maakaasua. Maakaasua saadaan esimerkiksi maaperästä pumpaamalla tai liuske kivistä hydraulisesti murtaamalla eli vesisäröttämällä. (U.S. Energy Information Administration 2018.)

Liuskekaasu on varsinkin Yhdysvalloissa ollut viime vuosina tapetilla ja saanut osakseen rajuakin kritisointia. Kritiikki kohdistuu liuskekaasun poraamisen yhteydessä usein tehtävään vesisärötykseen, jossa kaasukaivoon pumpataan suuri määrä vettä, johon on sekoitettu useita kemikaaleja. Vesisäröityksellä saadaan avattua liuskekivissä olevia halkeamia ja näin ollen maksimoitua kaasun tuottoa. Esimerkiksi Permian Basinissä (New Mexico ja Texas) pumpattiin keskimäärin 42 500 m³ vettä per kaivo vuonna 2016 (Kondash ym. 2018). Suuri veden käyttö varsinkin kuivilla alueilla on saanut aikaan paljon keskustelua. Toinen keskustelua herättänyt aihe liittyy vesisäröitykseen on veteen liittävätkä kemikaalit ja niiden vaikutus pohjaveteen. Yleisesti kemikaalien osuus vesisäröitykseen käytettävästä nesteestä on noin 0,5–2 %. Esimerkiksi 4 miljoonan gallonan vesisäröitykseen käytetään 0,5 % seoksella noin 82,2 tonnia erinäisiä kemikaaleja. (Hazen & Sawyer 2009, 34–35.) Näihin kemikaaleihin lukeutuu muun muassa peroksidirikkihappo, jolla vähennetään nesteen viskositeettiä, ja suolahappo, jolla puhdistetaan halkeamat mudasta ja epäpuhtauksista, jotta särötysneste pääsee paremmin halkeamiin (Earthworks 2019).

Metaania on varastoitunut myös jään sisään suuria määriä. Tätä kutsutaan *metaanihydraatiksi* ja myös *metaaniklatraatiksi*. Metaanihydraatti muodostuu, kun metaani ja vesi kohtaavat kylmissä olosuhteissa ja paineen alaisuudessa. Metaanihydraattiesiintymät ovat yleisesti ikiroudan alla tai mantereiden reunamilla olevissa merenalaisissa sedimenteissä eli maapohjan kerrostumissa. (U.S. Department of Energy 2019.) Jäähän varastoitunutta metaania on valtava määrä. U.S. Department of Energy (2019) arvion mukaan metaania on varastoitunut jäähän jopa 7 080-21 000 biljoonaa kuutiometriä ja metaanihydraattikerrostumat voivat olla jopa satoja metrejä paksuja. Suuren metaanivaranon takia monet maat ovat panostaneet tutkimuksiin, ja tavoitteena on löytää turvallinen

ja kustannustehokas tapa hyödyntää näitä varantoja. Kärkipäässä ovat Yhdysvallat, Kiina, Japani, Intia ja Etelä-Korea.

Metaania voidaan valmistaa myös synteettisesti. Esimerkiksi Lappeenrannan teknillisen yliopiston ja VTT:n yhteisessä Soletair-projektissa voidaan hiilivetyjä muodostaa synteettisesti. Hiilivetyyn tarvittava hiili saadaan ilmakehässä olevasta hiilidioksidista ja vety saadaan eroteltua vedestä sähkön avulla. Tarvittava sähkö vedyn eroittamiseksi tuotetaan uusiutuvalla energialla eli tässä tapauksessa joko aurinko- tai tuulivoimalla. (Soletair 2019.) Myös Saksassa on kehitetty tätä Power-To-Gas-teknologiaa.

Maakaasun polttamisesta syntyvät hiilidioksidipäästöt ovat noin 27 prosenttia pienemmät verrattuna dieselöljyyn ja raskaaseen polttoöljyyn (U.S Energy Information Administration 2019). Maakaasun polttamisesta ei myöskään synny rikin oksidipäästöjä, sillä maakaasu jalostetaan ennen markkinoille vientiä (Smil 2019, 22). Tämä on meriliikenteelle suuri etu, sillä päästörajoitukset kiristyvät jatkuvasti. Tällä hetkellä SECAs-alueilla eli rikkipäästökontrolloiduilla alueilla, joihin kuuluu Itämeri, Pohjanmeri, Pohjois-Amerikan alue ja osittain Karibianmeri (Puerto Ricon ja Yhdysvaltain neitsytsaarien alueella), polttoaineessa saa olla enintään 0,1 massaprosenttia rikkiä. Muilla kuin päästökontrolloiduilla alueilla, rajoitus on tällä hetkellä 3,5 massaprosenttia. Vuodesta 2020 alkaen kuitenkin myös ei-päästörajoitetuilla alueilla rikkipitoisuuden rajoitus putoaa 0,5 massaprosenttiin. (IMO 2019e.)

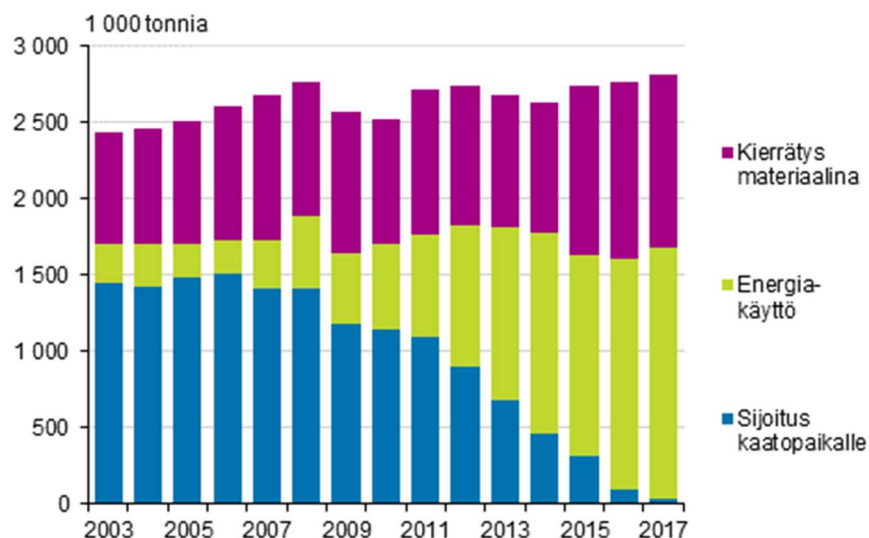
Maakaasun hyödyt polttoaineena eivät kuitenkaan jää pelkkiin päästöistä saavutettuihin hyötyihin. Lisäksi maakaasun korkean oktaaniluvun vuoksi voidaan moottorin puristusuhde suunnitella korkeaksi ja näin ollen saadaan moottorin parempi hyötysuhde.

Täytyy kuitenkin muistaa, että maakaasun pääkomponentti metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Metaanin GWP eli Global Warming Potential -arvot vaihtelevat 28–36 välillä 100 vuoden ajanjaksolta. Toisin sanoen, jos kuutio metaania pääsee vapautumaan ilmakehään, sen ilmastoa lämmittävä vaikutus 100 vuoden ajalta on 28–36-kertainen kuutioon hiilidioksidia verrattuna. (EPA 2017.) Metaania voi päästä vapautumaan ilmakehään esimerkiksi maakaasun pumppauksen yhteydessä, laitteiston ja putkien vuoto- tapauksissa, onnettomuuksissa ja bunkrauksen yhteydessä. Maakaasun ympäristöystävällisyyttä ja kasvihuonepäästöjä tarkasteltaessa on siis syytä tarkastella maakaasun päästöjä aina maakaasukentältä sen polttamiseen asti. On haastavaa arvioida, kuinka suuri osuus maakaasusta pääsee ilmakehään ennen polttamista. Arviot heittelevät suurestikin, 1 prosentista jopa 9 prosenttiin (ks. Nature 2013).

Maakaasu sellinaan soveltuu huonosti liikennepolttoaineeksi, sillä metaanin ominaistiheys nollan celsiusasteen lämpötilassa on vain $0,72 \text{ kg/m}^3$ (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 9). Tavanomaisten polttoaineiden ominaistiheydet ovat reilusti suuremmat. Esimerkiksi bensiinin ominaistiheys on $720\text{--}780 \text{ kg/m}^3$ ja dieselin vastaavasti $810\text{--}860 \text{ kg/m}^3$ (Lampinen 2009, 429). Tämä tarkoittaa, että maakaasua käyttävä kulkuneuvo tarvitsisi noin tuhat kertaa suuremman polttoainesäiliön saavuttaakseen saman toimintamatkan. Tämän ongelman ratkaisemiseksi maakaasu joko paineistetaan tai nesteytetään ennen polttoainesäiliöön varastoimista.

2.1 Biokaasu

Biokaasu on eloperäisistä raaka-aineista tuotettua metaanipitoista kaasua. Biokaasun raaka-aineena voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia maatalouden, yhteiskunnan ja teollisuuden sivutuotteita tai jätteitä. Tärkeää on, että biomassa hajoaa suhteellisen nopeasti ja näin ollen tuottaa biokaasua. Puu esimerkiksi sisältää vaikeasti hajoavaa orgaanista ainetta ja näin ollen ei sovellu sellaisenaan biokaasun raaka-aineeksi. (Kymäläinen 2015, 21.) Biokaasua syntyy myös kaatopaikoilla ja koska metaani on voimakas kasvihuonekaasu, pyritään se keräämään talteen ja hyödyntämään myöhemmin energialähteenä. (Kinnunen & Rintala 2015, 10.) EU:n säädösten ja lisääntyneen ilmastotietoisuuden vuoksi kaatopaikoille sijoitetaan enää vain noin 1 % yhdyskuntajätteestä (Suomen virallinen tilasto 2019). Yhdyskuntajätteen hyödyntäminen energiatuotannossa on kasvanut vuosi vuodelta (ks. kuvio 1).



Kuvio 1. Yhdyskuntajätteen käsittely (Suomen virallinen tilasto 2019)

Biokaasua voidaan myös tuottaa kasveista, joita kasvatetaan juurikin tähän käyttöön. Näitä kasveja kutsutaan energiakasveiksi. Suomessa energiakasveiksi soveltuu esimerkiksi nurmirehu, rehumaisi ja ruokohelpi. (Luostarinen 2015, 37.) Energiämäärällä mitattuna Suomessa tuotetaan vuosittain biokaasua noin yhden terawattitunnin (TWh) verran, joista suurin osa valmistetaan puhdistamolietteestä ja orgaanisista yhdyskuntajätteistä (Energiala 2018).

Biokaasun sisältämä metaani vaihtelee 50–70 prosentin välillä raaka-aineista riippuen. Biokaasu jalostetaan biometaaniksi ennen käyttöä liikennepolttoaineena. Jalostuksen jälkeen kaasun metaanipitoisuus on noin 95–98 prosenttia. Jalostettu biokaasu vastaa koostumukseltaan perinteistä maakaasua. Biokaasu voidaan myös painestaa tai nesteyttää normaalin maakaasun tapaan. (Kinnunen & Rintala 2015, 17–18.)

Biokaasu voi hyvinkin olla tulevaisuudessa isossakin osassa korvaamassa fossiilisia polttoaineita. Tuotantomäärien täytyy kuitenkin kasvaa reilusti ennen sitä. Gasumin mukaan (2019) tämän hetkisten Suomen biokaasulaitosten mahdolliseksi tuotantokapasiteetiksi on arvioitu 10 TWh ja tämä määrä riittäisi noin miljoonalle kaasualolle. Tärkeää on myös ottaa huomioon se, miten biokaasu on tuotettu. Ei ole ympäristön kannalta kestävä, jos esimerkiksi hakataan sademetsiä peltomaaksi ja näillä peltomailla kasvatetaan energiakasveja, joista tuotetaan biokaasua polttoaineeksi.

Maailmalla biokaasua tuotetaan suurimmaksi osaksi orgaanisista jätteistä ja maatalouden sivutuotteista (kts. IEA 2019) Esimerkiksi Saksassa 2015 tuotetusta biokaasusta yli 85 % tuli maataloudesta (DBFZ 2015).

2.2 CNG

CNG eli paineistettu maakaasu on yleistymässä oleva polttoaine henkilöautoliikenteessä. Paineistetun maakaasun käsittely ei sisällä yhtä paljon riskejä kuin nesteytetyn maakaasun käsittely, joten sen tankkaaminen ei edellytä mitään koulutusta. Maakaasu paineistetaan noin 200 barin paineeseen varastointia varten. 200 barin paineeseen paineistetun maakaasun tiheys, riippuen maakaasun koostumuksesta, on noin 180 kg/m³ (vrt. normaalissa ilmanpaineessa 0,72kg/m³). (Unitrove 2019.) Tämä on kuitenkin vielä vähän verrattuna perinteisten nestemäisten polttoaineiden tiheyksiin. Uutta kulkuneuvoa ostaessa, toimintamatka yhdellä tankkauksella on kuitenkin painava kriteeri. Tästä

syystä suurin osa markkinoilla olevista kaasuautoista on Bi-fuel tyyppisiä eli toimivat kahdella eri polttoaineella. Henkilöautopuolella yleisesti moottorit ovat kipinäsytytteisiä bensiinimoottoreita, jotka toimivat myös maakaasulla. Jos tällaisella autolla ajetaan esimerkiksi puolet matkasta pelkällä bensiinillä, syö se tietenkin kaasuautoilusta saatavaa ympäristöhyötyä. Suomessa kaasuautoista pitää maksaa käyttövoimaveroa 3,1 snt/pv/alkava 100 kg (TRAFICOM 2019a). Eli 1 700 kg painavan kaasuauton käyttövoimavero on hieman reilut 190 e/vuodessa. Tämä voi joissain tapauksissa vaikuttaa kielteisesti kaasuauton ostopäätökseen, sillä vastaavasta bensiiniautosta ei joudu maksamaan tätä ylimääräistä käyttövoimaveroa.

2.3 LNG

Merenkulkuliikenteessä liikuteltavat massat ovat hyvin suuria ja näin ollen vaativat myös paljon polttoainetta. Paineistetulla maakaasulla toimivan aluksen polttoainesäiliöiden tulisi siis olla erittäin suuria ja tämä taas veisi rahdilta ja matkustajilta paljon arvokasta tilaa.

Jäähdyttämällä normaalissa ilmanpaineessa maakaasu alle -162 °C lämpötilaan, muuttuu maakaasun olomuoto kaasusta nesteeksi ja sen tiheys melkein 600-kertaiseksi normaalista kaasumaisesta muodostaan. Nestemäisen maakaasun tiheys on noin 420–470 kg/m³. Tiheys vaihtelee hieman maakaasun koostumuksesta riippuen. Nesteytetyn maakaasun koostumus vaihtelee ja siksi onkin syytä aina varmistaa polttoaineen laatu toimittajalta. Taulukosta 5 käy ilmi, miten raskaampien hiilivetyjen osuus nostaa tiheyttä. Tiheyteen vaikuttaa myös lämpötila ja paine. Nesteytettyä maakaasua varastoidaan hyvin eristettyihin säiliöihin, joissa suurin osa kaasusta pysyy nesteenä ilman ulkopuolista jäähdystystä. Tämä johtuu siitä, että eristys estää ison määrän lämpöenergiaa virtaamasta säiliöön ja nesteytetyn maakaasun höyrystyminen sitoo lämpöenergiaa ja näin ollen neste pysyy kiehumislämpötilassaan.

Nesteitä, jotka ovat jäähdytetty alle kiehumispisteensä ja joiden kiehumispiste on alle -90 celsiusastetta, kutsutaan kryogeenisiksi aineiksi. Koska nestemäisen maakaasun lämpötila on hyvin alhainen ja sen kiehumispiste on -162 °C , luokitellaan se kryogeeniseksi aineeksi. Kryogeenisiä aineita käsiteltäessä on syytä käyttää erityistä varovaisuutta ja huolellisuutta. Vaaratekijöitä ovat esimerkiksi nesteen nopea höyrystyminen, paleltumisvammat ja materiaalin haurastuminen. (AGA 2019b.)

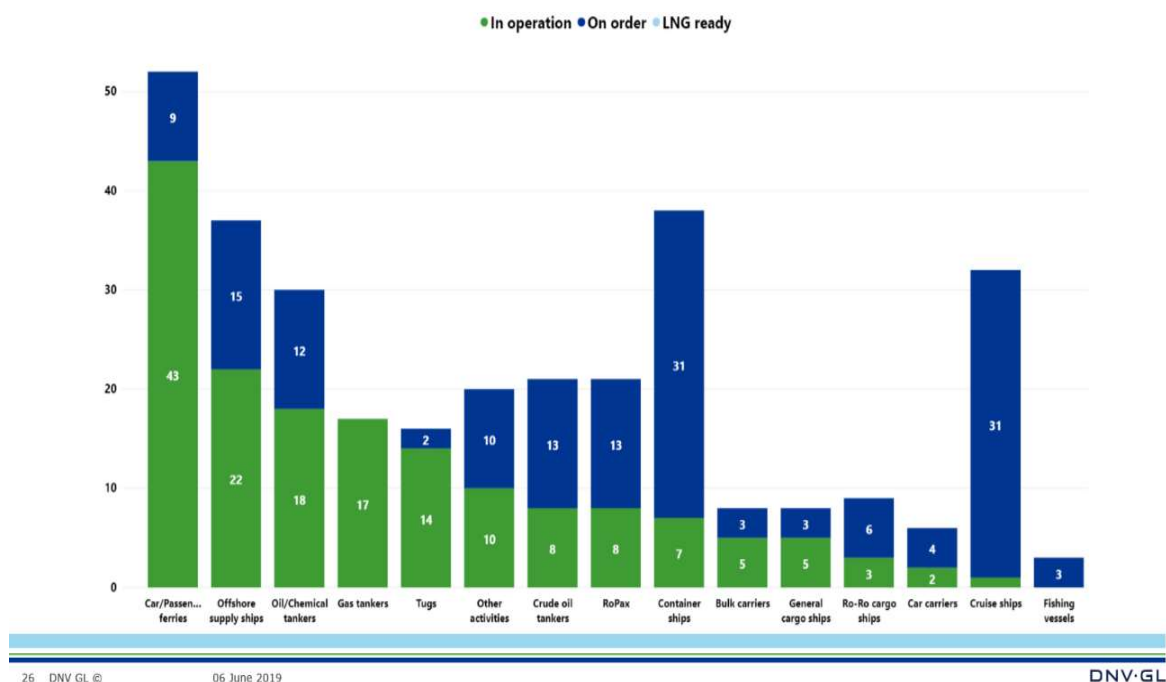
Taulukko 5. Esimerkkejä LNG koostumuksesta ja ominaisuuksista (SFS-EN ISO 16903:2015, 3).

Ominaisuudet kiehumispisteessä normaalissa paineessa	LNG Esimerkki 1	LNG Esimerkki 2	LNG Esimerkki 3
Molaarinen koostumus (%)			
Typpi (N ₂)	0,13	1,79	0,36
Metaani (CH ₄)	99,8	93,9	87,20
Etaani (C ₂ H ₆)	0,07	3,26	8,61
Propaani (C ₃ H ₈)	–	0,69	2,74
Isobutaani (C ₄ H ₁₀)	–	0,12	0,42
n-butaani (C ₄ H ₁₀)	–	0,15	0,65
Pentaani (C ₅ H ₁₂)	–	0,09	0,02
Moolimassa (kg/kmol)	16,07	17,07	18,52
Kiehumispiste (°C)	-161,9	-166,5	-161,3
Tiheys (kg/m ³)	422	448,8	468,7
Kaasun tilavuus / nesteen tilavuus (m ³ /m ³)	588	590	568
Kaasun tilavuus / tonni nestettä (m ³ /10 ³ kg)	1 392	1 314	1 211
Latenttilämpö (kJ/kg)	525,6	679,5	675,5
Kaasun kalorimetrinen lämpöarvo (MJ/m ³)	37,75	38,76	42,59

Nesteytettyä maakaasua kuljettavat säiliöalukset ovat käyttäneet nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan jo pitkään. Vuonna 1959 ensimmäinen LNG tankkeri kuljetti nestemäistä maakaasua Yhdysvaltojen Lousianasta Canvey Islandille, Englantiin (Wärtsilä 2019a). Vasta viime vuosikymmeninä nesteytetyn maakaasun käyttö muissakin aluksissa on lisääntynyt. Esimerkiksi matkustaja-autolautat Viking Grace (2013) ja Tallinkin omistama Megastar (2017) käyttävät nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan.

Joulukuussa 2018 luovutettu AIDAnova oli ensimmäinen nesteytettyä maakaasua käyttävä risteilijä. Costa Smeralda on siis toinen risteilijä maailmassa, jonka pääpolttoaine on LNG. Suunnitelmassa ja rakenteilla on useita LNG risteilijöitä lisää (ks. kuvio 2). IMO:n

asettamattomat rikkipäästörajat ovat ainakin yksi suuri syy, miksi varustamot ovat alkaneet harkitsemaan muita polttoainevaihtoehtoja perinteisen raskaan polttoöljyn sijaan. Muita vaihtoehtoja olisivat kalliin vähärikkisen polttoöljyn käyttö tai sitten asentaa alukseen rikkipesurit, jotka ovat kalliita ja tilaa vieviä ratkaisuja. Toinen syy nestemäisen maakaasun käyttöön voi liittyä paremman julkikuvan antamiseen puhtaampien polttoaineiden edelläkävijänä.



Kuvio 2. LNG alukset tyypeittäin (DNV 2019, Safety4Sea 2019 mukaan)

Vaikka maakaasu säilötään nestemäisenä, se täytyy höyrystää kaasuksi ennen polttamista. Höyrystymistä tapahtuu myös tankissa itsestään ja tätä kaasua kutsutaan boil-off kaasuksi.

2.3.1 Maakaasun nesteyttäminen

Maakaasu nesteytetään isoissa nesteytyslaitoksissa. Nesteytyksen ensimmäisessä vaiheessa maakaasusta poistetaan elohopea ja rikkivety. Seuraavassa vaiheessa kaasusta eroitetaan hiilidioksidi ja vesi amiineroittelulla. Vesi ja hiilidioksidi jäätyvät ja voivat aiheuttaa ongelmia nesteytyksen loppuvaiheessa. Vesi voi myös aiheuttaa korroosiota. Veden ja hiilidioksidin poiston jälkeen kaasu jäähdytetään propaanikiertoisella jäähdytyslaitteistolla. Kaasu jäähdytetään propaanin kanssa noin $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja tällöin raskaammat hiilivedyt nesteytyvät ja näin ollen saadaan ne eroiteltua kaasusta pois. Lopuksi kaasu

ohjataan kryogeeniseen lämmönvaihtimeen, jossa kaasu jäähdytetään lähelle $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, jolloin kaikki kaasu nesteytyy. Kryogeeninen lämmönvaihdin sisältää kylmäaineita, joka paineistetaan kompressorilla ylipaineeseen. Ylipaineinen kylmäaine jäähdytetään propanikiertoisella jäähdyttimellä ja tämän jälkeen kylmäaineen paine romahdutetaan, jolloin se jäähtyy entisestään. (Cameron LNG 2018.)

2.3.2 LNG:n kuljetus

Nesteytettyä maakaasua kuljetetaan usein suurilla tankkereilla. Nakilat omistaa eniten LNG tankkereita maailmassa. Nakilatin laivastoon kuuluu 24 perinteistä LNG-tankkeria ($145,000\text{--}170,000\text{m}^3$), 31 Q-Flex tankkeria ($210,000\text{--}217,000\text{m}^3$) ja 14 Q-Max tankkeria ($263,000\text{--}266,000\text{m}^3$). (Nakilat 2018.) Käytössä on myös pienempiä LNG-tankkereita. Yleisimmin kokoluokkaa $4\ 000\text{--}40\ 000\text{m}^3$ (Wärtsilä 2019b).

Nesteytettyä maakaasua kuljetetaan myös säiliöautoilla. Yleisesti säiliöautoon mahtuu $34\text{--}56\ \text{m}^3$ LNG:tä (EMSA 2018). Suomessa ja Ruotsissa on liikenteessä LNG-maxitralereita, jolla voi kuljettaa jopa noin $80\ \text{m}^3$ LNG:tä (Outokumpu Stainless Oy 2012, 10). Nesteytettyä maakaasua myytiin ympäri maailmaa 288 miljoonaa tonnia vuonna 2017 ja myynti kasvoi 316,5 miljoonaa tonniin vuonna 2018 (IGU 2019, 12). Nesteytetyn maakaasun suurimmat tuontimaat ovat Qatar, Australia ja Malesia. Norjan vientikaasusta nesteytettyä maakaasua on noin viisi prosenttia. (Gasum 2019.)

2.3.3 LNG hinta

Polttoaineen valinnassa tietenkin hinta on ratkaisevassa asemassa. Polttoaineiden hinnat maailman markkinoilla ilmoitetaan yleensä yksikössä $\$/\text{mmBTU}$. BTU eli British Thermal Unit on yksikkö, joka vastaa energiamäärää, joka tarvitaan yhden paunan vettä lämmittämiseen yhdellä fahrenheit asteella. (EIA 2019). 1 BTU on niin pieni arvo, käytetään yleisesti yksikköä mmBTU eli miljoonaa BTU:ta.

LNG:n hinta vaihtelee hieman alueittain, mutta taulukkoon 6 on vertailun vuoksi lisätty keskivertohintoja eri polttoaineille.

Taulukko 6. Polttoaineiden hintoja lokakuussa 2019 (DNV GL 2019a).

HFO 380	9,8/mmBTU
MGO	15,1\$/mmBTU
Maakaasu	3,6\$/mmBTU

Maakaasun hintaan täytyy vielä lisätä nesteyttämiskulut, jotka ovat DNV (2019) mukaan luokkaa 3–5 \$/mmBTU. Bunkraustavasta riippuen hintaan tulee vielä lisäksi kuljetuskustannukset alukseen.

MGO eli vähärikkinen polttoöljy on huomattavasti kallein vaihtoehto polttoaineista. Sitä käyttämällä voidaan tietenkin jatkaa aluksen operoimista ilman laitteistomuutoksia. HFO taas vaatii rikkipesurit, jotta sen rikkipäästöt pysyvät sallituissa rajoissa.

LNG-järjestelmän asennuskulut ovat perinteisiä järjestelmiä kalliimpia, mutta käytössä polttoaineen hinnan kautta investointikulu kompensoituu. Edellyttäen, ettei kaasun hinta nouse verrattuna öljypohjaisiin polttoaineisiin.

3 ASETUKSET JA STANDARDIT

Nesteytetyn maakaasun ominaisuudet asettavat vaatimuksia aluksen henkilökunnalle ja myös haasteita laivanrakennukselle. Nesteytetyllä polttoaineella toimivan aluksen luotettavan toiminnan ja turvallisen polttoaineen käsittelyn takaamiseksi on asetettu useita erinäisiä asetuksia ja direktiivejä. Osa asetuksista ja määräyksistä koskevat risteilyaluksia yleisesti ja osa määräyksistä koskevat suoraan vain aluksia, jotka käyttävät alhaisen leimahduspisteen omaavaa polttoainetta kuten nesteytettyä maakaasua.

Haasteita varsinkin risteilyaluksissa asettaa tilankäyttö. Koska nestemäisen maakaasun energiatiheys on pienempi, mitä raskaalla polttoöljyllä, polttoainesäiliöiden tulee olla isompia. Maakaasusäiliöiden lisäksi, moottorivalinnasta riippuen, tarvitsee asentaa erilliset pilottipolttoainesäiliöt. Risteilyaluksessa käytössä on rajallinen määrä tilaa, joten kaikki ylimääräistä tilaa vievät ratkaisut ovat pois hyttimäärästä ja siten pois maksavista asiakkaista. Polttoainesäiliöiden lisäksi ylimääräistä tilaa vievät polttoaineen höyrystämislaitteistot.

Maakaasu asettaa myös haasteita aluksen suunnittelulle. Räjähdyksivaaralliset tilat ja matkustajien turvallisuus onnettomuustilanteissa vaativat erityisiä ratkaisuja verrattuna perinteiseen raskaalla polttoöljyllä toimivaan alukseen. Kuitenkin säädettyjä lakeja, standardeja ja organisaatioiden ohjeita noudattamalla saadaan aluksesta rakennettua turvallinen käyttöä.

3.1 IMO

IMO eli International Maritime Organization on järjestö, joka on perustettu Yhdistyneiden Kansakuntien toimesta Geneven kokouksessa vuonna 1948. Järjestön nimi oli aiemmin Inter-Governmental Maritime Consultative Organization, lyhyemmin IMCO. Nimi kuitenkin vaihdettiin vuonna 1982. IMO on perustettu edistämään laivaliikenteen turvallisuutta. IMO on laatinut useita sopimuksia, millä on pyritty parantamaan turvallisuutta, ehkäisemään onnettomuuksia ja kontrolloimaan laivaliikenteen päästöjä. IMO:n laatimien sopimusten alle kuuluu laivan koko elinkaari, suunnittelusta aina laivan hävitykseen asti. (IMO 2019a.)

3.1.1 SOLAS

SOLAS eli International Convention for the Safety of Life at Sea on kansainvälinen yleissopimus, jonka tavoitteena on taata ihmishengen turvallisuus merellä. Ensimmäinen versio sopimuksesta tehtiin vuonna 1914. Viimeisin solmittu sopimus on vuodelta 1974 ja siihen on tehty lisäys, jonka mukaan uudet muutokset tulevat voimaan tiettyinä päivinä, ellei muutos saa tarvittavaa määrää vastalauseita sopimuksen osapuolilta. Tämän jälkeen sopimukseen on tullut useita lisäyksiä. Sopimus määrittelee alusten rakentamista, varustelemista ja käyttöä koskevat standardit taatakseen alusten turvallisen käytön. Sopimuksen päivittämisestä vastaa IMO:n alainen komitea Maritime Safety Committee eli MSC. (IMO 2019d.)

3.1.2 IGF-koodi

IGF- koodi eli International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flash-point Fuels hyväksyttiin MSC:n kokouksessa 3.6–12.6.2015. Samassa kokouksessa tehtiin SOLAS- sopimukseen muutoksia, joissa viitataan IGF-koodiin. Tämä tarkoittaa, että koodin noudattaminen on pakollista kaikille SOLAS-sopimuksen allekirjoittajamaille. Varsinaisesti IGF-koodi tuli voimaan vasta 1.1.2017, jonka jälkeen valmistetut alukset täytyy rakentaa IGF-koodin mukaisesti. IGF- koodi koskee aluksia, jotka käyttävät kaasua tai muuta matalan leimahduspisteen omaavaa polttoainetta. Pääpaino IGF-koodissa on kuitenkin LNG-järjestelmässä. IGF- koodi sisältää määräyksiä järjestelmien, koneiden ja laitteiden materiaaleista, asennuksesta, käytöstä sekä valvonnasta. (IMO 2015.)

3.1.3 IGC-koodi

IGC-koodi eli International Code of the Construction And Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk on lisätty SOLAS-sopimukseen 1.7.1986 (IMO 2019b). IGC-koodi nimensä mukaisesti asettaa vaatimuksia nesteytettyjen kaasujen kuljettamiseen tarkoitetuille aluksille ja niiden laitteistolle. IGC-koodi ei suoranaisesti koske risteilyaluksia, mutta sitä voidaan soveltuvin osin käyttää niihin.

3.1.4 STCW

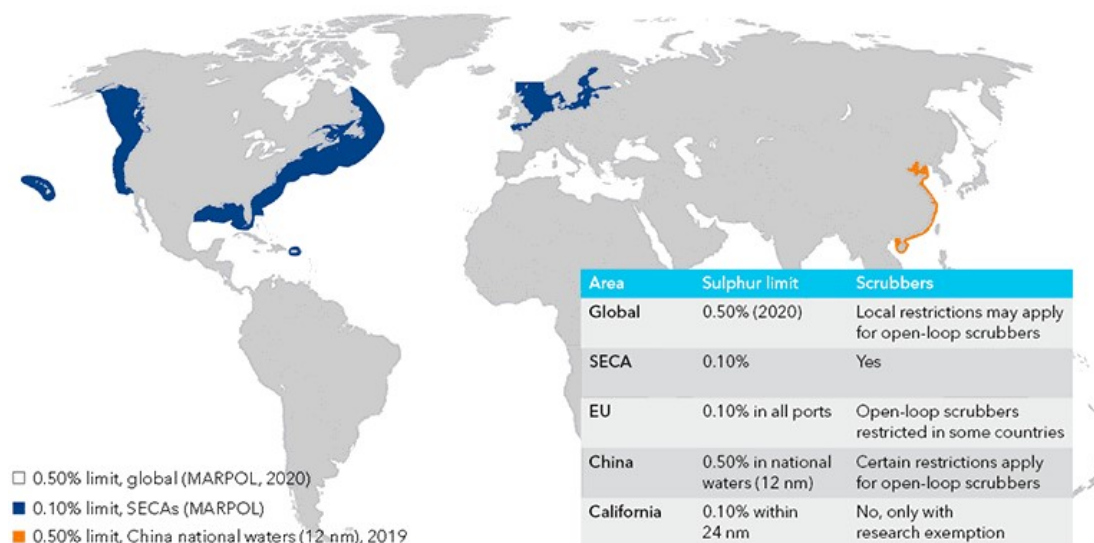
STCW eli Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers on IMO:n määrittelemä asetus, joka määrittelee laivalla työskentelevän henkilökunnan pätevyysvaatimukset. STCW- asetus määrittelee IGF-aluksen henkilöstölle kaksi eri pätevyysvaatimusta riippuen henkilön työtehtävistä ja vastuista (STCW- asetus, A-V/3). *Peruskoulutuksesta* saatava lisäpätevyytodistus ja *syventävästä* koulutuksesta saatava lisäpätevyytodistus. Syventävän koulutuksen lisäpätevyytodistus vaatii koulutuksen lisäksi kokemusta IGF-aluksella työskentelystä. Suomessa lisäpätevyytodistukset myöntää liikenne- ja viestintävirasto eli Traficom. Lisäpätevyytodistukset tulee uusina viiden vuoden välein. (TRAFICOM 2019b.) STCW- asetuksen määrittelemiä perustason ja syventävän tason kursseja järjestää moni eri taho.

STCW- asetus edellyttää perustason lisäpätevyytodistusta kaikilta IGF-aluksella työskenteleviltä henkilöiltä, joilla on määrättyjä turvallisuustehtäviä liittyen polttoaineen käyttöön tai toimintaan hätätilanteissa. STCW- asetus edellyttää syventävän tason lisäpätevyytodistusta IGF- aluksen päälliköiltä, konemestareilta ja kaikilta muilta, jotka ovat välittömässä vastuussa polttoaineen käytöstä. (SCTW-asetus, A-V/3.)

3.1.5 MARPOL

MARPOL eli International Convention for the Prevention of Pollution from Ships on sopimus, jonka tarkoitus on estää ja vähentää meriliikenteen päästöjä normaalissa käytössä ja onnettomuustilanteissa. Sopimus on hyväksytty IMO:ssa vuonna 1973, mutta sopimus tuli voimaan vasta vuonna 1978. Sopimukseen on tullut lisäyksiä hyväksymisen jälkeen. Tällä hetkellä sopimus sisältää 6 lisäystä. (IMO 2019c.)

IMO:n päästörajat ovat tiukempia päästökontrolloidulla alueilla, kuin muilla vesillä. Kuvasta 2 näkyy IMO:n asettamat päästökontrolloidut alueet. Polttoaineessa saa päästökontrolloiduilla alueilla olla rikkiä vain 0,1 % ja vuoden 2020 alusta muilla alueilla vain 0,5 %. Suurempi rikkipitoisuus polttoaineessa on sallittu, jos alukseen on asennettu pakokaasupäästöjä puhdistava rikkipesuri. (IMO 2019e.)



Kuva 2. Päästökонтроloidut alueet (DNV GL 2019b)

Rikkipäästöjen lisäksi IMO on määrittänyt typen oksideille päästörajat. Päästörajat koskevat dieselmoottoareita, joiden moottoriteho on yli 130 kW. Päästörajat eivät kuitenkaan koske moottoreita, joita käytetään yksinomaan hätätarkoituksiin. Taulukosta 7 käy ilmi IMO:n asettamat päästörajat. Luokkaa 3 sovelletaan vain tiettyihin aluksiin, kun alus operoi päästökонтроloidulla alueella. Muilla alueilla sovelletaan luokkaa 2. (IMO 2019e.)

1.1.2016 tai sen jälkeen valmistettuun alukseen, joka operoi Pohjois-Amerikan ja Yhdysvaltojen Karibianmeren alueella, sovelletaan päästöluokkaa 3 (IMO 2019e).

1.1.2021 tai sen jälkeen valmistettuun alukseen, joka operoi Itämerellä tai Pohjanmerellä, sovelletaan päästöluokkaa 3 (IMO 2019e).

Taulukko 7. Typen oksidien päästörajat (IMO 2019e)

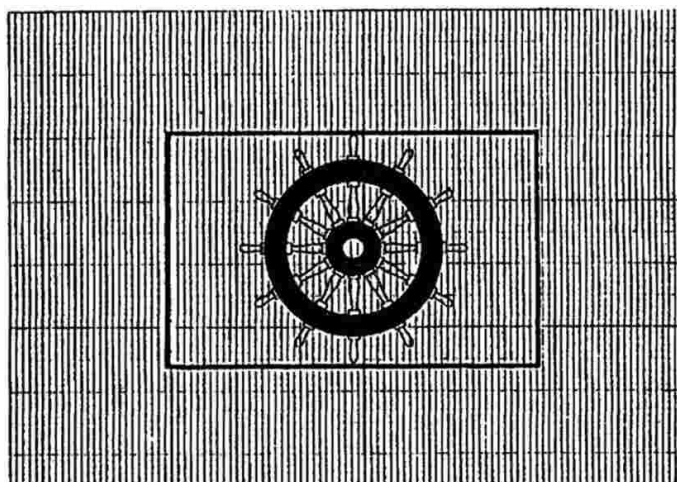
Luokka / Tier	Valmistusajankohta	Päästörajat (g/kWh)		
		n=moottorin pyörimisnopeus (rpm)		
		n < 130	n = 130-1999	n ≥ 2000
I	1.1.2000	17.0	$45 \cdot n^{-0,2}$ Esim. 720rpm = 12.1	9.8
II	1.1.2011	14.4	$44 \cdot n^{-0,23}$ Esim. 720rpm = 9.7	7.7
III	1.1.2016	3.4	$9 \cdot n^{-0,2}$ Esim. 720rpm = 2.4	2.0

Typen oksidipäästöjen muodostumiseen vaikuttaa pääasiassa polttoaineen ja ilman sisältämä tyyppi, palamislämpötila sekä paine. Matalapaineiset maakaasumoottorit usein täyttävät IMO:n 3. luokan ilman pakokaasujen jälkikäsittelyä.

Korkeapaineiset maakaasu- ja dieselmoottorit vaativat pakokaasun jälkikäsittelyn päästökseen päästörajojen alle. Vaihtoehtoja on esimerkiksi pakokaasujen kierrätysjärjestelmä (EGR) tai SCR-järjestelmä. SCR eli Selective catalytic reduction on järjestelmä, jossa pakokaasut ohjataan katalysaattoriin, jonne suihkutetaan pelkistinainetta, joka pelkistää typen oksidit. Pelkistinaineena toimii usein urea tai ammoniakki.

3.2 MED

MED eli Marine Equipment Directive on Euroopan parlamentin ja neuvoston asettama direktiivi 2014/90/EU, joka koskee laivavarusteita. Direktiivi on annettu 23.7.2014 ja pantu täytäntöön jäsenvaltioissa 18.9.2016. Direktiivin tarkoitus on yhdenmukaistaa kansainväliset turvallisuusvaatimukset laivavarusteiden osalta. Direktiivin avulla lippuvalliot voivat varmistua, että laivavarusteet ovat valmistettu ja testattu noudattaen kaikkia kansainvälisiä turvallisuusvaatimuksia. Laitteesta, joka täyttää direktiivin mukaiset vaatimukset, tulee löytyä ruorimerkki (kuva 3). Joissain tapauksissa merkintä voi olla myös digitaalinen. (2014/90/EU, 1-10.)



Kuva 3. Ruorimerkki (2014/90/EU).

3.3 Luokituslaitokset

Luokituslaitoksen tehtävä on varmistaa, että alus rakennetaan kaikkien säädösten ja standardien mukaisesti. Luokituslaitos on tiivistä mukana aluksen suunnittelusta aina aluksen käytöstäpoistoon asti. Luokituslaitos antaa hyväksytyjen piirustusten ja aluksen tarkistuksen jälkeen alukselle luokituksen. Luokitus kertoo kuinka hyvin laiva tai alus vastaa luokituslaitoksen ja kansainväliset sopimusten ja standardien asettamia vaatimuksia. Luokituksen avulla esimerkiksi viranomaiset, varustamot ja vakuutuslaitokset saavat tietoa kuinka luotettava ja turvallinen alus on. (Bureau Veritas 2019.)

Suurimpia luokituslaitoksia ovat esimerkiksi Iso-Britanniasta kotoisin oleva Lloyd's Register, Norjalainen DNV eli Det Norske Veritas, Belgialainen Bureau Veritas ja Italialainen RINA eli Registro Italiano Navale.

3.4 Keskeisimmät standardit ja ohjeistukset

Standardien avulla voidaan alus rakentaa turvallisesti. Standardien lisäksi varsinkin aluksen operoinnissa on hyvä käyttää erinäisiä ohjeistuksia. Esimerkiksi SIGTTO eli The Society of International Gas Tanker and Terminal Operators on järjestö, joka julkaisee ohjeistuksia LNG-aluksen turvalliseen käsittelyyn. Osa julkaisuista on ladattavissa ilmaiseksi ja osa julkaisuista on maksullisia. Taulukkoon 8 on kerätty keskeisimpiä standardeja ja ohjeistuksia LNG-alukselle.

Taulukko 8. Keskeisiä standardeja ja ohjeistuksia LNG-alukselle.

EN 1149-5	Suojavaatetuksen sähköstaattiset ominaisuudet
IEC 60092-502	Laivan sähköasennukset
ISO 20088	Eristysmateriaalien kryogeenisen vuodon kestävyys
ISO/TS 16901	LNG-laitoksen riskien arviointi
ISO/TS 18683	LNG-aluksen polttoainejärjestelmä ja asennukset
SFS-EN 12308	LNG-putkiston laippaliitosten tiivisteiden testaus
SFS-EN 12838	LNG:n näytteenottojärjestelmien testaus
SFS-EN 16726	Maakaasun laatuvaatimukset
SFS-EN 60079-0	Räjähdyksivaaralliset tilat: laitteiden yleiset vaatimukset
SFS-EN 60079-10-1	Kaasuräjähdyksivaarallisten tilojen tilaluokitus
SFS-EN 60079-10-2	Pölyräjähdyksivaarallisten tilojen tilaluokitus
SFS-EN 60079-14	Räjähdyksivaarallisten tilojen sähköasennukset
SFS-EN ISO 16903	LNG:n ominaisuudet ja kryogeeniset materiaalit
SFS-EN ISO 20519	LNG:n bunkraus
IMO MSC.285	Interim guidelines on safety for natural gas-fuelled engine installations in ships
IMO IGF-code	International code of safety for ship using gases or other low-flashpoint fuels
IMO IGC-code	International code of the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk
SIGGTO	Liquefied gas fire hazard management
SIGTTO	Liquefied gas handling principles on ships and in terminals
SIGTTO	Prevention of rollover in LNG ships
SIGTTO	Ship to ship transfer guide for petroleum, chemicals and liquefied gases

Ylläolevien standardien lisäksi LNG-järjestelmään voidaan soveltaa lukuisia muita standardeja. Luokituslaitoksilla voi olla myös omia ohjeistuksia LNG-järjestelmän asennukselle ja operoinnille.

4 RISKIT JA NIIDEN HALLINTA

Nesteytetyn maakaasun käsittelyyn liittyy aina riskejä. Ennen LNG:llä toimivan voimalaitoksen suunnittelemista ja rakentamista olisi syytä tehdä kattava riskikartoitus. Kartoittamattomat riskit voivat aiheuttaa suuriakin taloudellisia seuraamuksia. Toimintahäiriöt ja onnettomuudet voidaan parhaiten välttää panostamalla riskianalyysiin. Riskien kartoitukseen on olemassa erilaisia työkaluja. PPA eli Potential Problem Analysis on yksi tunnetuimmista riskien tunnistusmenetelmistä. Tämän lisäksi voidaan käyttää myös yksityiskohtaisempia menetelmiä kuten HAZOP eli Hazard and Operability Study ja toimintavirheanalyysiä (FMEA= Failure Modes and Effects Analysis). Monen riskianalyysin perusideana on määrittää riskille todennäköisyys ja seurauksen vakavuus. Näiden perusteella saadaan riskille ”riskikerroin”, jonka avulla voidaan päättää onko riski siedettävä. Riskien hallinnassa luonnollisesti myös pyritään löytämään keinoja, joilla voidaan estää tai pienentää riskien todennäköisyyttä ja seuraamuksia.

4.1 Boil-off-kaasun hallinta

Koska polttoainesäiliöitä ei pidetä ulkoisilla laitteilla kylmänä, pienikin lämpötilan nousu aiheuttaa sen, että osa nestemäisestä kaasusta höyrystyy kaasuksi. Tätä kaasua kutsutaan boil-off-kaasuksi. Ensimmäiseksi nestemäisestä kaasusta höyrystyy alhaisimman kiehumispisteen omaavat yhdisteet. Näin ollen boil-off-kaasu usein sisältää paljon typpeä. (SFS-EN ISO 16903:2015, 3–4.) Boil-off-kaasun lisääntyminen tankissa nostaa tankin sisäistä painetta.

IGF- koodin (6.7.2) mukaan polttoainetankki on varustettava vähintään kahdella paineenrajoitusventtiilillä ja yksi venttiili pitää olla mahdollista kytkeä irti järjestelmästä vuodon tai toimintahäiriön seurauksena. Normaalitylanteessa paineenrajoitusventtiileitä ei jouduta käyttämään, vaan boil-off-kaasu ohjataan esilämmittimen kautta joko kompressorille, jossa kaasun paine nostetaan ja siitä edelleen toisen tason lämmittimelle, jonka jälkeen kaasu ohjataan moottorin kaasunsyöttöyksikölle tai vaihtoehtoisesti boil-off-kaasu ohjataan suoraan höyrykattilan kaasunsyöttöyksikölle.

Sopivalla toteutuksella boil-off-kaasu on mahdollista jäähdyttää ja näin ollen nesteyttää se uudelleen. Laitteisto kaasun uudelleen nesteytykseen on kuitenkin kallis ja tilaavievä ratkaisu. Jälleennesteyttäminen onkin yleisempää maalla olevissa LNG-voimalaitoksissa. (Nygård 2016.)

4.2 Nesteytetyn maakaasun vuodot

Nesteytetyn maakaasun erittäin alhaisen lämpötilan vuoksi laivan rakenteet voivat haurastua ja kärsiä vaurioita, jos nesteytetty maakaasu pääsee kosketuksiin rakenteiden kanssa. IGF -koodi määritteleeekin kohdassa 5.10, että paikkoihin, joissa mahdollinen vuoto voi aiheuttaa vaurioita laivan rakenteille, on asennettava valumiskaukalot. Valumiskaukalot pitää asentaa myös paikkoihin, joissa mahdollinen vuoto pitää rajoittaa tiettyyn alueeseen. Valumiskaukalot tulee valmistaa materiaalista, joka kestää tarpeeksi kylmää. Valumiskaukalot on lämpöeristettävä laivan rakenteista sillä tavalla, että laivan rakenteet eivät jäähy alle suunnittelulämpötilan. Kaukaloihin on myös asennettava tyhjennysventtiili, jotta mahdollinen sadevesi pystytään valuttamaan kaukalosta pois. (IGF-koodi, 5.10.)

Nesteytetystä maakaasusta höyrystyneen kaasun lämpötila on hyvin lähellä nesteytetyn maakaasun lämpötilaa ja sen tiheys on ilmaa suurempi kylmänä. Kylmä höyry painuu alaspäin ja vasta lämmentyään alkaa nousta ylöspäin. Näin ollen höyrystynytkin kaasu voi aiheuttaa vaurioita laivan rakenteille ja vakavia paleltumisvammoja ihmisille. (SFS-EN ISO 16903:2015, 4.)

4.3 Järjestelmän paineenrajoitusventtiilit

Maakaasu ei nesteydy normaalissa lämpötilassa missään paineessa. Maakaasu täytyy jäädyttää alle -80 celsiusasteen, ennen kuin maakaasun on mahdollista nesteytyä yli-paineessa. Tämä tarkoittaa sitä, että jos nestemäistä maakaasua jää putkistoon esimerkiksi kahden sulkuventtiilin väliin, niin lämmitessään se höyrystyy ja kerää painetta putkistoon. Jos kaasun lämpötila nousee yli -80 celsiusasteen, kaasu ei enää nesteydy ja paine kasvaa putkistossa niin kauan, että paine pääsee purkaantumaan esimerkiksi putkiston haljettua. (SFS-EN ISO 16903:2015, 5.) Tästä syystä putkistot ja komponentit, joissa maakaasu kulkee nestemäisenä ja on eristettävissä järjestelmästä, tulee varustaa paineenrajoitusventtiileillä (IGF-koodi, 7.3.1.3).

4.4 Räjähdyksvaaralliset tilat

Metaani-ilmaseos on syttymiskelpoinen, kun metaanin pitoisuus on vähintään 5 tilavuusprosenttia ja enintään 15 tilavuusprosenttia. Syttymisrajat ovat riippuvaisia ilman lämpötilasta ja happipitoisuudesta. (Suomen Kaasuliitto ry 2014, 12.) Standardisarja SFS-EN 60079 käsittelee räjähdysvaarallisten tilojen tilaluokittelua, laitteita ja sähköasennuksia. Turvallisuuden parantamiseksi kaikki tilat, joissa voi esiintyä kaasua, on syytä luokitella eri tilaluokkiin. Tilaluokka määrittää tilaan asennettavien sähkölaitteiden suojaus- ja testausvaatimuksia. Tilaluokitus riippuu kaasuvuodon todennäköisyydestä ja vuodon määrästä. SFS-EN 60079-10-1:2015 määrittelee tilaluokat seuraavasti:

Tilaluokka 0: Tila, jossa räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai toistuvasti.

Tilaluokka 1: Tila, jossa räjähdyskelpoinen kaasuilmaseos todennäköisesti esiintyy normaalikäytössä ajoittain

Tilaluokka 2: Tila, jossa räjähdyskelpoinen kaasuilmaseos ei todennäköisesti esiinny normaalikäytössä, mutta mikäli sellainen kuitenkin esiintyy, sen esiintymisaika on lyhyt.

IGF-koodin (12.5.1) mukaan vähintään polttoainetankit, paineenrajoitusputkistot ja kaikki putket ja laitteet, joissa kulkee polttoainetta, tulee luokitella tilaluokkaan 0.

Tilaluokkaan 1 tulisi luokitella esimerkiksi tilat, joissa on polttoainetankkin liittyvät venttiilit ja läpiviennit putkistolle (TCS), polttoainetankkeja sisältävät tilat sekä bunkrausasemat. Vaikka normaalitilanteessa konehuone on räjähdysvaaraton tila, laitteiden, joiden pitää toimia kaasun havaitsemisen jälkeen, tulee olla tilaluokitus 1 mukaisia. (IGF-koodi 12.5.2.)

Avoimet tai puolisoljetut tilat, jotka ovat enintään 1,5m päässä tilaluokasta 1, tulee luokitella tilaluokkaan 2. Myös tila, jossa on luokku TCS:ään, tulee olla luokitettu vähintään tilaluokkaan 1. (IGF- koodi 12.5.3.)

Tilat, joita ei ole IGF-koodissa mainittuna, tulee luokitella IEC standardin 60092-502 mukaan. Myös sähkölaitteet, jotka asennetaan räjähdysvaaralliseen tilaan, täytyy olla saman standardin mukaisia. (IGF-koodi 12.3.1.)

Sähkölaitteiden asennusta räjähdysvaarallisiin tiloihin tulee välttää. Räjähdysvaarallisiin tiloihin tulisi sijoittaa ainoastaan toiminnan ja turvallisuuden kannalta pakolliset laitteet. Konehuoneeseen asennetut kaasutunnistimet, palo- ja kaasuhälyttimet, valot ja tuulettimet tulee olla luokitettu tilaluokkaan 1 soveltuvaksi. Kaikki konehuoneessa olevat sähkölaitteet, joita ei ole luokiteltu vähintään tilaluokkaan 1 soveltuvaksi, tulee automaattisesti kytkeytyä irti, jos vähintään kaksi kaasutunnistinta ilmoittaa ilmaseoksen olevan yli 40 % alemmasta syttymisrajasta. (IGF-koodi, 12.3.) Eli toisin sanoen, jos metaania on ilmassa yli 2 %.

Räjähdysvaarallisissa tiloissa työskennellessä tulee käyttää antistaattisia työvaatteita ja työkenkiä. EN 1149-5 standardi määrittelee näille työvaatteille vaatimukset. Soveltuvissa työvaatteissa on antistaattista kuvaava symboli. Sähkölaitteita, joita ei ole luokiteltu tilaluokkaan soveltuvaksi, ei tule viedä räjähdysvaaralliseen tilaan.

4.5 Rollover

Rollover on mahdollinen bunkrauksen yhteydessä, kun tankkiin otetaan uutta maakaasua. Jos uuden maakaasun tiheys poikkeaa jo tankissa olleesta maakaasusta, on mahdollisuus, että aineet kerrostuvat tankkiin. Tiheämpi maakaasu painuu tankin pohjalle ja kerää lämpöä, koska lämpöä ei kulu nesteen höyrystymiseen. Lopulta aineet sekoittuvat nopeasti keskenään ja tätä kutsutaan rolloveriksi. Yleisesti näin tapahtuessa alempana oleva aine on ehtinyt lämpeämään ja tästä syystä aineiden sekoittuessa vapautuu paljon kaasuksi höyrystynyttä maakaasua eli boil-off-kaasua. Joskus tätä kaasua vapautuu erittäin paljon ja tämä johtaa nopeaan paineen nousuun tankissa. (SFS-EN ISO 16903:2015, 5.) Raju paineenousu tankissa voi johtaa ylipaineventtiilien aukeamiseen ja tätä tulisi välttää kasvihuonepäästöjen takia.

Boil-off-kaasun kehittymisen huomattava alentuma normaalista on yleensä havaittavissa ennen rolloveria. Parhaimmat keinot estää rollover on tarkkailla boil-off-kaasun kehittymistä ja tarvittaessa tehostaa aineiden sekoittumista ja eri laatuisten maakaasun bunkraaminen eri säiliöihin. (SFS-EN ISO 16903:2015, 6.)

4.6 RPT

RPT eli rapid phase transition voi tapahtua, kun tietyissä olosuhteissa nestemäistä maakaasua pääsee paljon nopeasti veteen. Nestemäinen maakaasu höyrystyy niin nopeasti, että tapahtuu räjähdysmäinen höyrystyminen. Yleisesti RPT:hen ei liity tulipaloa, mutta se täyttää räjähdysten ominaisuudet. (Bubbico & Salzano 2008.)

4.7 Paleltumat

Kuten jo aikaisemmin todettu, nesteytetty maakaasu on erittäin kylmää myös höyrystymisen jälkeen. LNG aiheuttaa ihon kanssa kosketukseen päästessään palovamman kaltaisia paleltumia. Kylmä höyry voi aiheuttaa vahinkoa silmille, vaikka altitusaika olisikin niin lyhyt, että naamaan tai käsiin ei tule paleltumia. Myös kylmän kaasun hengittäminen voi aiheuttaa keuhkoille vahinkoa. LNG:tä sisältävät eristämättömät putket ovat erittäin kylmiä ja paljas iho voi jäätyä putkeen kiinni. Käsitellessä nesteytettyä maakaasua ja sitä sisältäviä laitteiston osia, on syytä noudattaa erityistä varovaisuutta ja käyttää henkilökohtaisia suojavälineitä. SFS-EN ISO 16903 standardin mukaan suositeltavia suojavälineitä ovat:

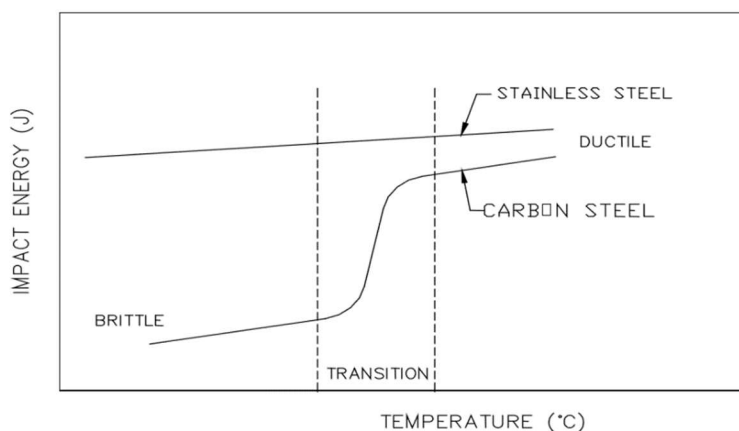
- Suojamaski tai turvalasit
- Reilun kokoiset nahkahansikkaat
- Tiukat suojahaalarit ilman taskuja ja lahkeet on hyvä ulottua kenkien ulkopuolelle

Suojavarusteet antavat kuitenkin vain lyhytaikaisen suojan roiskeiden varalta ja kosketusta LNG:n kanssa tulee välttää. Jos suojavälineet altistuvat maakaasulle, tulee ne tuulettaa hyvin ennen siirtymistä suljettuun tilaan tai mahdollisen syttymislähteen lähelle. (SFS-EN ISO 16903:2015, 7.) Suojavälineiden tulee myös olla antistaattisia.

4.8 Materiaalin haurastuminen ja lämpölaajeneminen

Kylmät olosuhteet asettavat materiaalivalinnalle tiettyjä rajoja. Normaalin hiiliteräksen iskukitkeys romahtaa jo muutaman kymmenen pakkasasteen lämpötilassa. Tämä tarkoittaa sitä, että kun lämpötila laskee tarpeeksi alas, tulee materiaalista hauras ja se voi

hajota esimerkiksi iskusta tai jännityksestä. Austeniittisen ruostumattoman teräksen iskutkeys taas pysyy melkein muuttumattomana lämpötilasta riippumatta (ks kuva 3).



Kuva 4. Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen transitiokäyrät (EIGA 2018, 5)

Myöskään kuparin, alumiinin tai messingin iskutkeys ei romahda lämpötilan vaikutuksesta, joten nämä soveltuvat myös materiaaliksi kylmiin olosuhteisiin. SFS-EN ISO 16903 standardista löytyy soveltuvia materiaaleja LNG-järjestelmään. Standardin mukaan soveltuvia materiaaleja tankkiin ovat esimerkiksi 9 % nikkeli-teräs ja austeniittinen ruostumaton teräs. Tiivistemateriaaliksi sopii esimerkiksi grafiitti, PTFE ja elastomeerit. Lämpöeristämiseen soveltuu esimerkiksi lasivilla, puu ja polyuretaani. (SFS-EN ISO 16903).

Laitteiston osiin kohdistuu myös suuria voimia lämpölaajenemisen vaikutuksesta, sillä lämpötila erot voivat olla melkein 200 °C. Putkiston pitää pystyä ottamaan lämpölaajeneminen vastaan, ettei jännitykset kasva liian suureksi. Lämpölaajenemisesta johtuvan jännityksen pienentämiseksi voidaan putkistoon rakentaa esimerkiksi laajenemissilmukoita tai saranoida putkien kiinnityksiä. Jos LNG-putkessa on vain vähän nestemäistä maakaasua, putken ala- ja yläosan lämpötilaerot saavat aikaan vääntävää momenttia, joka kohdistuu etenkin laippaliitoksiin. (SFS-EN ISO 16903, 10). Tästä syystä putkisto tulisi rakentaa pääosin hitsaamalla ja mahdollisimman vähän käyttää pulttiliitoksia. (IGF-koodi, 7.3.6)

4.9 BLEVE

Paine aiheuttaa nesteen kiehumispisteen kasvamisen. Nestettä, joka on lämmennyt yli kiehumispisteensä, mutta pysyy vielä nesteinä, kutsutaan englannin kielisellä termillä

superheated. Suomenkielinen sana tälle on ylikuumennettu neste. Jos jostain syystä paine putoaa äkillisesti, tapahtuu tämän ylikuumennetun nesteen nopea ja voimakas höyrystyminen ja tämä ilmiö on BLEVE eli Boiling Liquid Expansion Vapour Explosion (SFS-EN ISO 16903). Tämä ilmiö voi tapahtua, jos nestettä säilytetään kovassa paineessa reilusti kiehumispisteen yläpuolella ja säiliö jostain syystä, esimerkiksi onnettomuuden seurauksena, hajoaa. Toinen mahdollinen aiheuttaja on tulipalo, joka lämmittää nesteen nopeasti ja höyrystynyt kaasu kerää säiliöön kovan paineen ja järjestelmää ei ole varustettu ylipaineventtiileillä tai ne ovat epäkunnossa. Seurauksena on säiliön repeäminen ja voimakas räjähdys.

LNG- järjestelmässä BLEVE on kuitenkin erittäin epätodennäköinen kahdesta eri syystä. Ensinnäkin LNG:tä ei säilytetä kovassa paineessa ja säiliöt ovat suunniteltu kestämaan painetta. Toiseksi LNG:tä säilytetään ja kuljetetaan eristetyissä säiliöissä ja putkissa, mitkä ovat suojattu tulelta. (SFS-EN ISO 16903, 6.)

4.10 Tulipalo

Nesteytetyn maakaasun täytyy höyrystyä kaasumaiseen olomuotoon, ennen kuin sen on mahdollista syttyä. Syttymiseen vaadittava seos on 5–15 % metaania ilmassa. Koska metaanin itsesyttymislämpötila on korkea (650 °C), vaatii seos ulkopuolisen syttymislähteen. Mahdollisia LNG tulipaloja on erilaisia ja suositeltavat sammutustoimet vaihtelevat tulipalon tyypin mukaan. Veden käyttöä tulipalon sammutuksessa tulee käyttää harkiten, mutta sitä voidaan käyttää esimerkiksi jäähdytykseen. Jauhesammutin on ensisijaisesti paras tapa sammuttaa LNG-tulipalo. Vaahtosammuttimella voidaan hillitä tulipalon liekkejä, estää lämpösäteilyä liekeistä ja pienentää nesteestä höyrystyvän kaasun määrää. Suljetut tilat voidaan myös tarvittaessa inertoida typen avulla ja näin ollen tukahduttaa tulipalo. Täytyy kuitenkin pitää mielessä, että ensisijainen toimenpide on aina katkaista ensin kaasun syöttö niiltä osin kuin mahdollista. (Dalaklis 2019.)

Höyrystynyt kaasupilvi syttyy, jos metaanipitoisuus on sopiva ja pilvi kohtaa syttymislähteen. Syttymislähteenä voi olla esimerkiksi palava liekki tai kipinä. Kaasupilvi palaa suhteellisen hitaasti (n. 41 cm/s). Palo jatkuu niin kauan, kun palamattomia hiilivetyjä on jäljellä. Palo etenee kaasun lähteelle ja voi johtaa suihkupaloon tai lammikkopaloon. (Dalaklis 2019.) Tilan riittävä tuuletus ja syttymislähteiden minimointi ovat hyviä tapoja tulipalon ennaltaehkäisemiseksi.

Suihkupalo syntyy lähteestä, josta kaasua tulee paineella. Tällainen lähde voi olla esimerkiksi vuotava venttiili tai putki. Kaasu vaatii myös syttymislähteen syttyäkseen. Syttymisen jälkeen liekki vetäytyy hiljalleen vuotokohtaan ja palaa siinä niin kauan kun kaasua riittää. Suihkupalon ensisijainen sammutustapa on katkaista kaasun virtaus. Joissain tapauksissa on turvallisempaa ja ympäristöystävällisempää antaa kaasun palaa pienellä liekillä vuotokohdassa. Jos liekin sammuttaa, pääsee tilaan muodostumaan höyrypilvi, joka voi syttyessään saada enemmän vahinkoa aikaiseksi. (Dalaklis 2019.)

Lammikkopalo on mahdollinen, jos iso määrä nestemäistä maakaasua on kerääntynyt lammikoksi. Lammikon pinnalta höyrystyy kaasua ja ilman kanssa sekoituessaan voi seoksesta muodostua syttymiskelpoinen. Lammikkopalon sammuttamiseen ei saa käyttää vettä. Vesi vauhdittaa nestemäisen kaasun höyrystymistä ja kasvattaa palonopeutta. (Dalaklis 2019.)

4.11 Hapeton tila

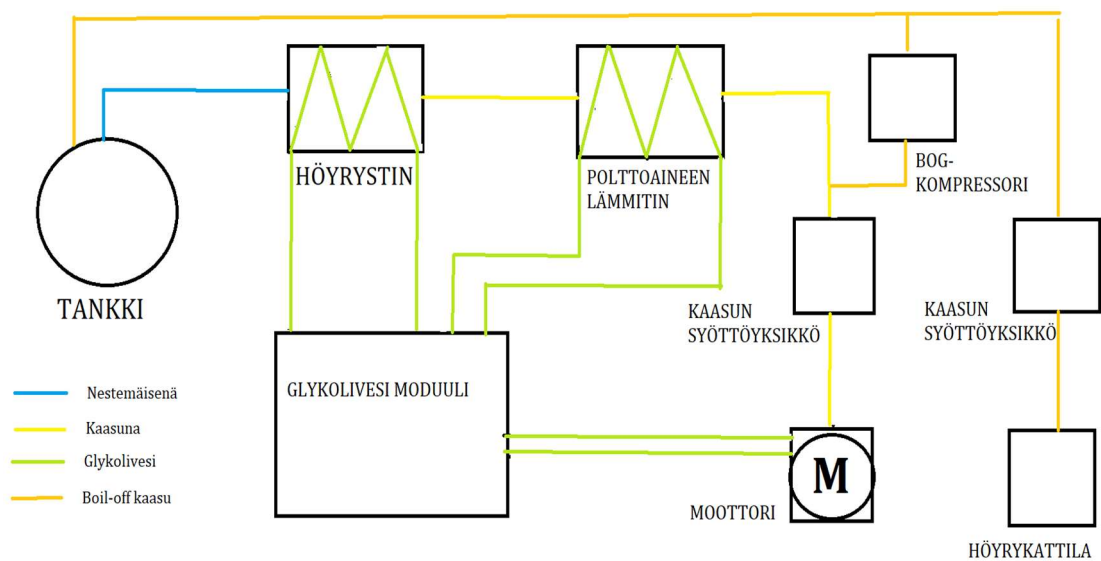
Metaani ei ole myrkyllinen kaasu, mutta suljetussa tilassa metaani voi syrjäyttää hapen. 50 % prosentoinen metaanipitoisuus ilmassa aiheuttaa jo vakavia tukehtumisen oireita kuten hengittämisen vaikeutta, reaktioajan hidastumista ja lihasten heikkoutta. (EMSA 2018, 251) Tästä syystä henkilökohtainen kaasutunnistin on hyvä pitää mukana tiloissa, joissa voi metaania esiintyä.

5 LAITTEISTO

Nesteytetyllä maakaasulla toimiva voimalaitos tarvitsee paljon erinäisiä laitteita ja komponentteja toimiakseen. Moottorin tuottama liike-energia täytyy muuttaa propulsiivomaksi. Tämä voidaan toteuttaa joko mekaanisesti tai sitten tuottaa moottoreilla sähköä, joka muunnetaan sähkömoottorilla propulsiivomaksi.

Moottorit ovat autolautoissa ja risteilijöissä yleisesti dual fuel- tyyppisiä. Tämä tarkoittaa, että moottoria voidaan ajaa kahdella eri polttoaineella. Costa Smeraldan tapauksessa nämä polttoaineet ovat MDO eli Marine diesel oil ja LNG eli nesteytetty maakaasu. Maakaasulla ajettaessa moottori käyttää myös pienen määrän MDO:ta pilottipolttoaineena.

IGF-koodi määrittää paljon vaatimuksia laitteistolle ja laitteiston sijoitukselle. Tarkoituksena ei ole koota tähän kaikkia IGF-koodin vaatimuksia, vaan jokaisen laitteen kohdalle on kerätty keskeisimpiä vaatimuksia IGF-koodista kyseiselle laitteiston osalle.



Kuva 5. Yksinkertaistettu kuva LNG-järjestelmästä

Nesteytetyn maakaasun polttamiseksi täytyy se muuttaa ensin takaisin kaasumaiseen olomuotoon. Tämä tapahtuu höyrystimellä. Höyrystin saa lämpönsä glykolivedestä, jota taas lämmitetään moottorissa kiertävän LT-veden kanssa (ks. kuva 5). Höyrystämisen jälkeen maakaasu johdetaan putkistoa pitkin FG-lämmittimelle eli Fuel Gas- lämmittimelle. Höyrystimen tapaan FG-lämmittinkin on glykolikiertoinen lämmitin.

5.1 Tankit

IMO:n asettama IGC-koodi jakaa LNG-tankit 3 eri luokkaan membraanitankkien lisäksi. Nämä 3 eri luokkaa ovat kaikki itsestään kantavia tankkityyppejä eivätkä ne ole kiinteä osa laivan rungon rakennetta. Tankkien eristystapa riippuu tankkityypistä. Yleisimmät eristystavat löytyvät taulukosta 9.

Taulukko 9. LNG-tankin eristystapoja (Kraack 2015).

Eristys	Hyviä puolia	Huonoja puolia
Polyuretaanivahto	-kustannustehokas	-jäätymisvaara -syttyvä -jätteiden hävitys kallista
Tyhjiöeristys / perliitti	-ei syttyvä -alhainen lämmönjohtavuus -kaksoisrakenne -eristys pysyy vaikka alipaine häviäisi	-alipaineen häviämisen riski -korkeat eristyskustannukset
Aerogeeli-matto	-ei syttyvä -alhainen lämmönjohtavuus -jokaisessa kerroksessa höyry-sulku	-kalliit materiaalikustannukset -jäätymisen riski
Tyhjiöeristys / Säteililyfolio	-ei syttyvä -alhaisin lämmönjohtavuus -on kaksoisrakenne	-alipaineen häviämisen riski -korkeimmat eristyskustannukset (vaatii paremman tyhjiön) , jopa 10x kalliimpi

5.1.1 A-tyyppin tankki

A-tyyppin säiliöt ovat suunniteltu käyttäen perinteisiä laivanrakennuksessa käytettäviä rakenneanalyyseja ja standardeja. Jos tankissa säilytettävän lastin lämpötilan on normaali ilmapaineessa alle -10 °C , on säiliö varustettava kaksoiseinämällä IGC-koodin

kohdan 4.5 mukaan. Koska A-tyyppin säiliö on pääosin rakennettu suorista pinnoista, suunnittelupaine pitää olla alle 0,7 bar. (IGC-koodi, 4.21.)

5.1.2 B-tyyppin tankki

B-tyyppin säiliöt ovat suunniteltu käyttäen mallinnustestejä ja edistyneitä analyysimenetelmiä. Jos tankissa säilytettävän lastin lämpötila alittaa normaalissa ilmanpaineessa -10 °C lämpötilan, on säiliö varustettava osittaisella kaksoiseinämällä ja pienen vuodon suojausjärjestelmällä IGC-koodin kohdan 4.5 mukaan. Myöskään B-tyyppin säiliön suunnittelupaineen ei tule ylittää 0,7 baria. (IGC-koodi, 4.22.) Yleisin B-tyyppin säiliö on Moss-pallotankki, joka on suosittu LNG-tankkereissa. Pallotankin huono puoli on se, että laivan runkoon jää paljon hukkatilaa. Tästä syystä membraanitankit ovat uusimmissa LNG-tankkereissa suositumpia.

5.1.3 C-tyyppin tankki

C-tyyppin säiliöt on suunniteltu käyttäen painesäiliöiden suunnittelukriteereitä, joihin on sisällytetty murtumismekaniikka ja halkeamien leviämiskriteerit. Pienin sallittu suunnittelupaine saadaan laskettua kaavan avulla. Kaava löytyy IGC-koodin kohdasta 4.23.1.2. Pienimmän sallitun suunnittelupaineen tarkoituksena on varmistaa, että dynaaminen rasitus pysyy riittävän pienenä, jotta alkuperäinen pintavirhe ei leviä enempää kuin puolet vaipan paksuudesta säiliön käyttöaikana. (IGC-koodi, 4.23) C-tyyppin tankki ei vaadi kaksoiseinämää. C-tyyppin tankki on joko sylinterimäinen, bilobe-tyyppinen tai trilobe-tyyppinen, jossa on kaksi tai kolme sylinterimäistä tankkia yhdessä. Sylinterimäisessä tankissa suunniteltu paine on 6-10 bar ja Bilobe / Trilobe -tyyppisessä tankissa noin 4 bar. (Kraack 2015)

5.1.4 Membraanitankki

Membraanitankit ovat valmistettu suoraan laivan runkoon. Suunnittelu perustana on, että lämpölaajeneminen tai muu laajeneminen tai supistuminen kompensoidaan ilman kohtuutonta riskiä menettää ”kalvon” tiiveys. Myös membraanitankki on varustettava kaksoiseinämällä, jos lastin lämpötila normaalissa ilmanpaineessa on alle -10 °C. Suunnittelu-

paine tulee olla yleisesti alle 0,25 bar, mutta jos rungon ainevahvuutta on lisätty ja kannattavan lämpöeristyksen lujuus sallii, voidaan suunnittelupainetta nostaa. Maksimi suunnittelupaine on kuitenkin 0,7 bar. (IGC-koodi, 4.24). Membraanitankki ei ole erillinen tankki, vaan se koostuu kahdesta nestetiiviistä- ja eristekerroksesta, jotka ovat rakennettu laivan runkoon.

5.2 Höyrystin ja polttoaineen lämmitin

Kuten jo aikaisemmin on todettu, nestemäinen maakaasu pitää höyrystää kaasuksi ennen moottorissa polttoa. Höyrystin on lämmönvaihdin, johon johdetaan LNG nestemäisenä ja otetaan ulos kaasumaisena. Höyrystimiä on markkinoilla erilaisia ja laitoksen tyyppi ja vaadittava höyrystämisteho vaikuttaa höyrystintyyppin valintaan. Toimintaperiaate on höyrystimissä samanlainen, mutta lämpöenergian lähde vaihtelee. Alle on listattu eri vaihtoehtoja höyrystintyyppille (Cryonorm 2019.)

- Ulkoilman lämpötilaa hyödyntävä höyrystin
- Höyryllä toimiva höyrystin
- Vedellä toimiva höyrystin
- Sähköllä toimiva höyrystin
- Polttoaineella toimiva höyrystin

Höyryllä, sähköllä ja polttoaineella toimivat höyrystimet vaativat ulkopuolista energiaa ja näin ollen lisäävät käyttökustannuksia ja päästöjä. Tosin tämän tyyppisillä höyrystimillä saadaan parempi höyrystämisteho, kuin esimerkiksi ulkoilman lämpötilaa käyttävällä höyrystimellä. Laivan LNG-laitoksessa yleisin höyrystintyyppi on vedellä toimiva höyrystin. Vaihtoehtoja vedellä toimivassa höyrystimessä on käyttää joko merivettä tai glykolivettä. Glykoliveden käyttö on suotuisampaa, sillä korroosioriskiä ei tällöin ole. Jos kiertovesipumppu jostain syystä pysähtyy, jäätymisvaaraa ei ole, kun käytetään glykolivettä. Glykolivesi saa lämpönsä moottorin jäähdytysvedestä lämmönvaihtimen kautta.

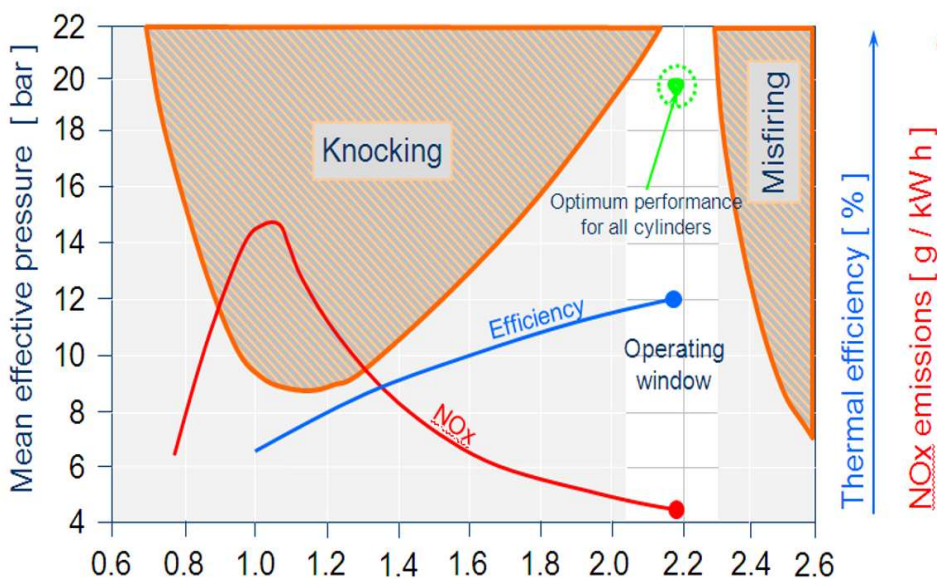
Höyrystämisen jälkeen kaasu on vielä kuitenkin kylmää ja ennen moottorille syöttöä kaasun lämpötila tulee nostaa syöttölämpötilaan. Tämä voidaan tehdä jo höyrystimessä itsessään tai käyttää erillistä polttoaineen lämmitintä. Polttoaineen lämmitin on myös lämmönvaihdin ja toteutustapoja on erilaisia. Yleinen tapa laivakäytössä on käyttää lämmönvaihtimessa samaa glykolivettä kuin höyrystimessäkin.

5.3 Moottori ja kaasunsyöttöyksikkö

Kaasumoottoreita on monenlaisia. Keskitytään tässä työssä kuitenkin vain nykyään yleisesti käytössä oleviin polttomoottoreihin. Moottorit voidaan jakaa alakategorioihin esimerkiksi sytytystyyppin, seoksen muodotuksen ja työkierron mukaan. Yksi tapa kategorisoida kaasumoottorit on seuraavanlainen.

5.3.1 Kipinäsytytteinen moottori

Kipinäsytytteisessä moottorissa seos muodostetaan imukanavassa ennen palotilaan syöttämistä. Seos voi olla joko stoikiometrinen tai laiha. Stoikiometrisessä seosta käytettäessä on mahdollista käyttää kolmitoimikatalysaattoria päästöjen hallintaan (Jääskeläinen 2019). Laihan seoksen käyttämistä taas puoltaa pienemmät NO_x-päästöt, mahdollisuus korkean teholliseen keskipaineeseen ja parempi hyötysuhde (ks. kuva 6). Esimerkiksi Rolls-Royce valmistaa tämän tyyppisiä moottoreita.



Kuva 6. Seoksen ja tehollisen keskipaineen vaikutus NO_x- päästöihin ja nakutusrajaan (Bakas 2015).

5.3.2 Dieselsytytteinen matalapainemoottori

Dieselsytytteisessä moottorissa ilma/polttoaineseos muodostetaan myöskin ennen palotilaan syöttämistä. Seos sytytetään pienellä määrällä dieseliä eli toisin sanoen pilottipolttoaineella. Pilottipolttoaineen etuna on tehokkaampi sytytyskyky kuin sytytystulpalla, joten laihakin seos saadaan varmasti syttymään. Tämän tyyppinen moottori on kaikista yleisin meriliikenteessä (Bakas 2015). Esimerkiksi Wärtsilän 46DF-sarjan moottorin ovat tämän tyyppisiä moottoreita.

5.3.3 Dieselsytytteinen korkeapainemoottori

Dieselsytytteisessä korkeapainemoottorissa polttoaine syötetään suoraan sylinteriin korkeapaineisena. Seos sytytetään pilottipolttoaineella. Tämän tyyppinen moottori ei ole kovinkaan altis nakutukselle, joten siinä voidaan käyttää myös alhaisemman metaaniluvun kaasua. Korkean paineen takia NO_x- päästöt ovat korkeat, eivätkä täytä IMO:n tier III vaatimuksia ilman pakokaasujen jälkikäsitteilyä. (Bakas 2015.) Esimerkiksi MAN valmistaa tämän tyyppisiä moottoreita. Taulukossa 10 on moottoreiden hyvien ja huonojen puolien vertailua

Taulukko 10. Moottoreiden vertailua (Bakas 2015, Jääskeläinen 2019).

Moottorityyppi	Hyvät puolet	Huonot puolet
Kipinäsytytteinen moottori	<ul style="list-style-type: none"> -voidaan ajaa 100 % maakaasulla -yksinkertainen polttoaineen syöttö (4-5bar) -pienet päästöt (täyttää IMO:n Tier III) -energiatehokas korkealla kuormalla 	<ul style="list-style-type: none"> -sytytystulppien kesto -altis nakutukselle (kaasun metaaniluvun täytyy olla korkea) -palamattomat metaanipäästöt -ei voi ajaa dieselillä
Dieselsytytteinen matalapainemoottori	<ul style="list-style-type: none"> -voidaan ajaa jopa 99 % maakaasulla -voidaan ajaa tarvittaessa myös pelkällä dieselillä -energiatehokas korkealla kuormalla -pienet päästöt (Täyttää IMO:n tier III maakaasulla ajettaessa) -vanha dieselmoottori voidaan muuttaa kaasukäyttöiseksi 	<ul style="list-style-type: none"> -altis nakutukselle (kaasun metaaniluvun täytyy olla korkea) -palamattomat metaanipäästöt -vaatii aina pienen määrän dieseliä
Dieselsytytteinen korkeapainemoottori	<ul style="list-style-type: none"> -pienet metaanipäästöt -ei altis nakutukselle (voidaan käyttää pienemmän metaaniluvun polttoainetta) -hyvä hyötysuhde -vanha diesel moottori voidaan muuttaa kaasukäyttöiseksi 	<ul style="list-style-type: none"> -korkeat NOx- ja hiukkaspäästöt (vaatii pakokaasun jälkikäsitteilyn) -korkeapainesyöttö on kalliimpi valmistaa -vaatii aina pienen määrän dieseliä toimiakseen)

IGF-koodin mukaan kaksoispolttoaineella toimivan moottorin tulee pystyä vaihtamaan dieselmodeen ilman keskytystä. Polttoaineen vaihdon kaasusta dieselille ja dieseliltä kaasulle tulee tapahtua siten, että moottoritehon häviötä on mahdollisimman vähän. Kaasun syöttö ei saa missään tilanteessa loppua myöhemmin kuin sytytys. Sama pätee myös pelkällä kaasulla toimivaan moottoriin. (IGF-koodi 10.3.2-10.3.3)

Kaasuturvalliselle alueelle sijoitetun moottorin polttoaineen syöttöputket tulee olla kaksoisputkia, jonka ulompi putki/kanava on joko paineistettu inertillä kaasulla tai ulompaan putkeen on muodostettu alipaineinen tuuletus. (IGF-koodi, 9.6.1)

5.3.4 Kaasunsyöttöyksikkö

Kaasunsyöttöyksikön tehtävänä on säätää kaasun paine sopivaksi moottorille. Kaasunsyöttöyksiköllä taataan myös nopea kaasun syötön katkaisu. IGF-koodi myös edellyttää jokaiselta kaasunkuluttajalta kaksi sarjaan asennettua sulkuventtiiliä ja yhden tuuletusventtiilin. Nämä on sijoitettu yleisesti kaasunsyöttöyksikköön. Jotta kaasun paineensäätö reagoi nopeasti ja on tehokas, tulee kaasunsyöttöyksikkö sijoittaa enintään 10m päähän moottorista. Usein kaasunsyöttöyksikkö on toteutettu kaasutiiviiseen koteloon, joka sisältää vaadittavat venttiilit. Näin ollen kaasunsyöttöyksikkö voidaan sijoittaa kaasuturvalliseen konehuoneeseen. (Karlsson & Högnabba & Kuusisaari 2013)

5.4 Konehuoneen luokittelu

Konehuoneen tulee olla joko kokonaan kaasuturvallinen alue tai sitten ESD-suojattu.

Kaasuturvallinen alue täytyy olla kaikissa tilanteissa kaasuton. Yksittäinen vika kaasuturvallisella alueella ei saa johtaa kaasun vapautumiseen konehuoneeseen. Kaikki kaasuputket kaasuturvallisessa konehuoneessa täytyy olla suljettu kaasutiivin kotelon sisään. (IGF-koodi, 5.5.2)

ESD-suojatun konehuone tulee olla kaasuturvallinen alue normaalitilanteessa, mutta onnettomuustilanteissa voi muuttua kaasuvaaralliseksi. Kaasun havaitsemisen jälkeen tulee kaikkien koneiden ja laitteiden, joita ei ole luokiteltu Ex-tilaan, kytkettyä pois päältä. Konehuoneen tuuletuksen täytyy olla mitoitettu siten, että se kykenee tuulettamaan tilan pahimmassa mahdollisessa vuototilanteessa. Vikatilanteet, jonka seurauksena on vaarallinen kaasupitoisuus, esimerkiksi putken repeytyminen, tulee pyrkiä estämään asentamalla ylipaineventtiilit ja ESD-järjestelmä. (IGF-koodi, 5.4.1)

5.5 Ilmalukot

IGF-koodin mukaan kaasuturvalliselta alueelta ei tule päästä suoraan kaasuvaaralliselle alueelle. Jos tällainen kulkuyhteys on pakollinen, tulee väliin sijoittaa ilmalukko. Ilmalukko tulee tuulettaa mekaanisesti ylipaineeseen vaaralliseen alueeseen nähden. Ilmalukko tulee olla suunniteltu niin, että missään tilanteessa turvalliselle alueelle ei pääse vuotamaan kaasua vaaralliselta alueelta. Ilmalukot tulee olla varustettu ääni- ja valohälyttimillä, joiden pitää antaa varoitus ilmalukon molemmille puolille, jos samanaikaisesti on

enemmän kuin yksi ovi auki. (IGF-koodi, 5.11-5.12) Costa Smeraldassa on neljä tällaista ilmalukkoa.

5.6 Typpigeneraattori

IGF-koodin mukaan järjestelmän pitää pystyä tuottamaan inerttiä kaasua, jossa saa olla enintään 5 % happea. (IGF-koodi, 5.14). Yleisesti käytetään typpeä inerttinä kaasuna. Tyypellä voidaan tyhjentää putkistot maakaasusta, ohjata paineilmaventtiileitä ja tarvittaessa laskea suljettujen tilojen happipitoisuutta.

Normaalissa ilmassa on noin 78 % typpeä ja 21 % happea. Typpigeneraattorilla voidaan ilmasta erottaa typpi erilleen. Ensin ilma paineistetaan kompressorilla, jonka jälkeen paineistettu ilma johdetaan membraanikuitukimpun läpi, jossa typpi erottuu erilleen. Paineella, virtausnopeudella ja membraanikuitujen määrällä ja koolla voidaan vaikuttaa typen puhtauteen eli hapen määrään lopullisessa kaasuseoksessa. (CGT 2019)

5.7 Maakaasuputkisto

IGF-koodin mukaan putkiston suunnittelupaineen täytyy olla vähintään 10 baria, pois lukien putkiston osat, joiden toinen pää on avoin. Näissä suunnittelupaineen pitää olla vähintään 5 baria. Putkisto täytyy rakentaa siten, ettei siihen kohdistu ylimääräisiä kuormituksia lämpölaajenemisen, tankkien tai rungon liikkeiden vaikutuksesta. Putkiston kylmät osat tulee eristää läheisistä rungon osista siten, ettei rungon lämpötila pääse putoamaan alle suunnittelulämpötilan. Kylmien putkien eristys pitää tehdä myös siksi, ettei ilmankosteus pääse tiivistymään pinnoille. Putkiston osat, jotka on lämpöeristetty laivan rungosta tulee maadoittaa asianmukaisesti. Edeltävä koskee myös tankkeja. (IGF-koodi, 7.2–7.3)

Putkisto täytyy rakentaa siten, ettei putken yksittäisen seinämän pettämisestä aiheudu kaasun vuotoa ympäröivään tilaan ja aiheuta varaa ihmisille, ilmastolle tai alukselle. Jokaisen kaasunkuluttajan pääsyöttölinjaan tulee asentaa pääkaasuventtiili, joka on suljettavissa käsin ja operoitavissa automaattisesti. Pääkaasuventtiili voidaan toteuttaa myös kahdella peräkkäisellä venttiilillä, joista toinen on käsin suljettava ja toinen automaattisesti operoitava. Pääkaasuventtiili tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle paikkaa, jossa kaasu lämmitetään. Pääkaasuventtiiliä ei kuitenkaan saa sijoittaa konehuoneeseen, jossa kaasunkuluttajat sijaitsee. (IGF-koodi, 9.2–9.4.)

Suljetuissa tiloissa kulkevat kaasuputket tulee olla kaksoisputkia tai putken tulee kulkea tuuletetussa kanavassa. Välitila ulommassa putkessa tai kanavassa tulee varustaa alipaineisella ilmanvaihdolla (30 ilmanvaihtoa tunnissa) ja varustaa kaasun tunnistusjärjestelmällä. Tämä ei koske varoventtiileiden linjastoa niiltä osin, kuin linjasto on kokonaisuudessaan hitsattu ja se kulkee mekaanisesti tuuletetuissa tiloissa. (IGF-koodi, 9.5)

5.8 Polttokenno

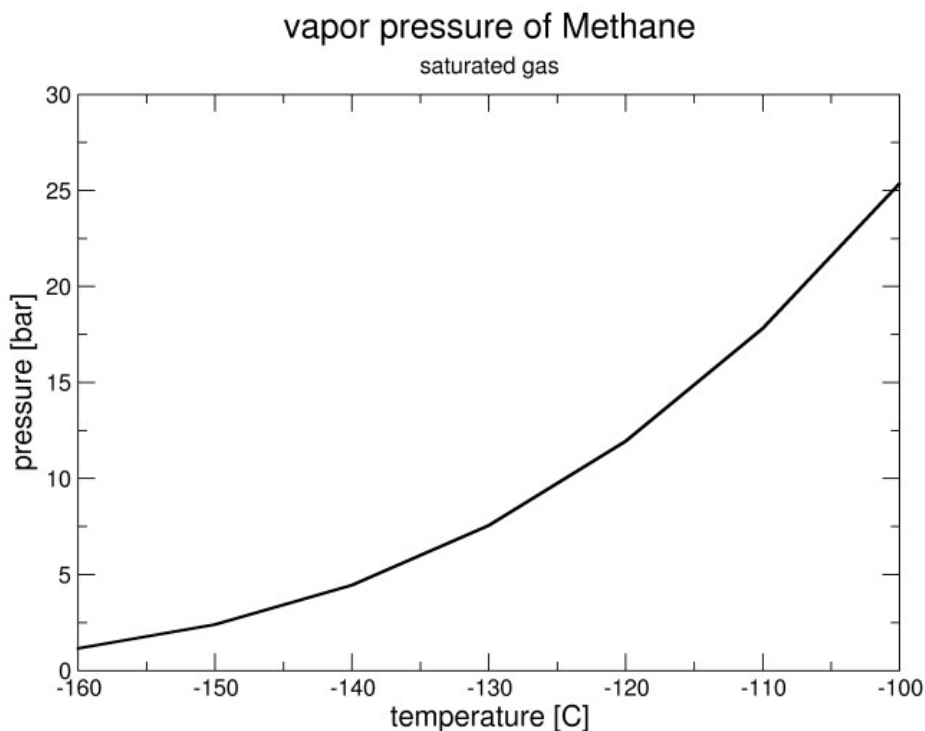
Polttokennojen käyttäminen meriliikenteessä ei ole vielä yleistä, mutta kiinnostusta aiheeseen tuntuu olevan. Meyer Turun telakalla rakennettaviin ICON- risteilyaluksiin tul- laan sijoittamaan polttokennoja, joilla tuotetaan aluksen tarvitsema sähkö satamissa.

Polttokennon polttoaineena toimii vety ja happi, joiden hapetus- ja pelkistysreaktioiden tuotteina syntyy sähköä. Sivutuotteina syntyy vettä ja lämpöä. Polttokennon etuna on reilusti parempi hyötysuhde kuin polttomootorissa. Polttokennot ovat kuitenkin kallit- ta valmistaa, koska katalyyttinä käytetään arvokkaita materiaaleja kuten platinaa. (Motiva 2019.)

LNG-käyttöiseen risteilijään soveltuu sulakarbonaattipolttokenno (MCFC). Koska MCFC- polttokenno toimii korkeissa lämpötiloissa, voidaan sen polttoaineena käyttää esimer- kiksi metaania. Metaani reformoidaan vedyksi, jonka jälkeen se voidaan hyödyntää polt- tokennon polttoaineena. (Motiva 2019.)

5.9 Boil-off-kaasun kompressori

Boil-off kaasun paineen nostamiseksi tarvitaan kompressoria. Korkeapainejärjestelmään soveltuu mäntäkompressori, kun taas matalapainejärjestelmään ruuvikompressori. Kompressorin täytyy myös olla kaasutiivis eikä kompressorin voiteluöljyä tule päästä kaasun joukkoon. (Nygård 2016). Koska maakaasun kiehumispiste muuttuu paineen vai- kutuksesta, täytyy joissain tilanteissa boil-off kaasun lämpötilaa kasvattaa ennen pai- neen kasvatusta, ettei kaasu tiivisty nesteeksi paineen vaikutuksesta (ks. kuva 7). Täl- läinen tilanne on esimerkiksi, jos tankin paine on kovin alhainen, niin boil-off kaasun läm- pötila on lähellä -160 °C ja nesteytyy jo suhteellisen pienelläkin paineella.



Kuva 7. Paineen vaikutus maakaasun kiehumispisteeseen (Ligterink 2013)

5.10 Höyrykattila

Höyrykattilalla tuotetaan nimensä mukaisesti höyryä laivan tarpeisiin. Samalla kattilalla lämmitetään myös kaikki laivassa käytettävä vesi. Höyrykattiloita on erilaisia. On esimerkiksi pakokaasun lämpöä höydyntäviä kattiloita ja polttoainetoimisia kattiloita. LNG-aluksessa on luonnollisesti järkevää käyttää kaasulla ja dieselillä toimivaa kattilaa perinteisen polttoöljytoimisen kattilan sijaan. Höyrykattilaa voidaan käyttää hyödyksi boil-off kaasun hallinnassa. Kattilassa voidaan polttaa maakaasua tankin paineella. Putkiston inertoinissa tyypellä ”työnnetään” maakaasu pois putkista. Tätä maakaasun ja typen seosta voidaan polttaa myös kattilassa. Tällöin ei tarvitse tätä metaanipitoista kaasua päästää ilmakehään. Käytännössä kattilassa poltetaan dieseliä ja tätä maakaasun ja typen seosta päästetään palotilaan vähän kerrallaan.

5.11 Kaasunilmaisimet

IGF-koodin kohdan 15.8.1 mukaan kiinteitä kaasunilmaisimia tulee asentaa vähintään:

- TCS:iin eli tiloihin, joissa on kaikki tankkutilaan ja tankkeihin johtavat läpiviennit ja säiliön venttiilit
- Kaikkiin kanaviin, jotka ympäröivät kaasuputkia
- Konehuoneisiin, joissa on kaasuputkia, kaasulaitteita tai kaasunkuluttajia
- Kaikkiin tiloihin, joissa on kaasun valmisteluun liittyviä pumppuja, kompressoreita tai lämmittimiä
- Kaikkiin suljettuihin tiloihin, joissa on kaasuputkia tai muita kaasulaitteita ilman kaasutiivistä koteloa
- Kaikkiin tiloihin, mihin kaasu voi kerääntyä, eikä kaasu pääse luonnollisesti hajaantumaan
- Ilmalukkoihin
- Kaasun lämmittämiseen tarkoitetun nesteen paisuntasäiliöön
- Moottorituloihin, joissa kulkee kaasua
- Asuintilojen ilmanottoihin ja myös konetilojen ilmanottoihin, jos riskien arvioinnin perusteella on syytä tähän

Valo- ja äänihälytyksen tulee lauetta, jos kaasupitoisuus ilmassa on enemmän kuin 20 % metaanin alemmasta syttymisrajasta. Turvallisuusjärjestelmän pitää aktivoitua, jos vähintään kaksi kaasunilmaisinta ilmoittaa kaasupitoisuuden ilmassa olevan enemmän kuin 40 % metaanin alemmasta syttymisrajasta. (IGF-koodi, 15.8)

5.12 Ilmanvaihto

Kaasuvaarallisten tilojen ilmanvaihtokanavat tulee olla erillään turvallisten tilojen ilmanvaihtokanavista. Tuulettimien sähkömoottorit tulee olla suunniteltu ja hyväksytty Ex-tiloihin, jos ne sijaitsevat kaasuvaarallisella alueella. Tuulettimet eivät saa aiheuttaa kipinöitä Ex-tiloihin tai ilmanvaihtokanaviin. (IGF-koodi, 13.3).

TCS:sän eli Tank Connection Spacen ilmanvaihdon kapasiteetin tulee olla yli 30 huoneen tilavuutta tunnissa. Jos muita riittäviä toimenpiteitä on tehty räjähdysturvallisuuden parantamiseksi, voidaan tarvittaessa ilmanvaihdon tiheyttä pienentää. TCS:sän ilmanvaihtokanavat tulee varustaa hyväksytyillä automaattisilla palopelleillä. (IGF-koodi, 13.4)

Kaasunkuluttajia sisältävän konehuoneen tuuletusjärjestelmän tulee olla täysin itsenäinen järjestelmä. Lähtökohtaisesti ESD- suojatun konehuoneen ilmanvaihtokapasiteetti tulee olla myös yli 30 ilmanvaihtoa tunnissa, mutta normaalitilanteessa ilmanvaihtotiheys voidaan laskea 15 ilmanvaihtoon tunnissa, jos kaasun havaitsemisen jälkeen järjestelmä nostaa automaattisesti tiheyden 30 ilmanvaihtoon tunnissa. (IGF-koodi, 13.5)

Jos bunkrausasema ei sijaitse ulkokannella, tulee ilmanvaihdon olla tarpeeksi tehokas poistamaan kaikki mahdolliset bunkrauksen aikana vapautuvat kaasut. (IGF-koodi, 13.7)

Polttoaineen valmistelutilojen ilmanvaihdon tulee olla alipaineinen ja ilmanvaihtotiheyden tulee olla yli 30 huoneen tilavuutta tunnissa. Ilmanvaihdon tulee olla toiminnassa, kun pumput tai kompressorit ovat käynnissä. (IGF-koodi, 13.6)

6 JÄRJESTELMÄN KÄYTTÖÖNOTTO

Käyttöönotto on prosessi, jolla varmistetaan, että laitteen tai laitoksen ja niiden eri kokonaisuuksien suunnittelu, valmistus, testaus ja toiminta vastaavat loppukäyttäjän vaatimuksia. Prosessi alkaa jo laitteen tai laitoksen alkuvaiheesta ja päättyy laitteen tai laitoksen luovuttamiseen.

6.1 Laiturikokeet

Jokaiselle laivan järjestelmälle on omat laiturikokeensa. Usein järjestelmälle on monta eri laiturikoetta järjestelmän eri osille. Laiturikokeiden tarkoitus on varmistua, että järjestelmä toimii niin kuin sen on tarkoitus toimia. Laiturikokeet suunnittelee yleisesti laivan rakentaja ja laiturikokeet hyväksytetään tilaajan edustajalla ja luokituslaitoksen edustajalla. Laiturikokeen suorittamiseen osallistuu aina rakentajan edustaja ja tilaajan edustaja. Luokituslaitoksen edustaja voi halutessaan osallistua kokeeseen ja usein, jos järjestelmä on ulkopuolisen toimittama, on järjestelmän toimittajaltakin on edustaja paikalla.

LNG-järjestelmän laiturikokeissa tarkastetaan muun muassa kaikkien antureiden toiminta, laitteiden mekaaniset vauriot ja simuloidaan vikatilanteita ja järjestelmän täytyy automaattisesti vastata niihin. Laiturikokeista tehdään pöytäkirjat, joista ilmenee tarkastetut kohteet ja nämä pöytäkirjat allekirjoitetaan ja dokumentoidaan.

6.2 Järjestelmän kuivaus ja jäähdytys

Järjestelmästä täytyy saada ilma ja kosteus pois ennen nestemäisen maakaasun bunkraamista. Ilman sisältävä happi voi aiheuttaa metaanin kanssa sekoituessaan räjähdysvaarallisen seoksen. Kosteus taas voi jäättyä LNG:n lämpötilan vuoksi ja tukkia putkistoja tai venttiileitä.

Järjestelmän kuivaus voidaan tehdä typellä. Järjestelmän läpi ajetaan typpeä niin kauan, että kaikki ilma ja suurin osa kosteudesta on poistunut järjestelmästä. Tärkeää on varmistua, että typpeä on varmasti mennyt kaikkialle putkistoon. Ongelmakohtia ovat esimerkiksi putkiston ”umpikujat”, joiden päässä on esimerkiksi venttiili.

Seuraava vaihe kuivauksessa on niin sanottu ”Gassing up”. Gassing upilla eli kaasuttamisella poistetaan järjestelmästä typpi ja hiilidioksidi. Hiilidioksidi muodostaa jäätyessään valkoista jauhoa, joka voi pahimmillaan tukkia venttiilit. Kaasuttamisessa järjestelmään syötetään lämmintä LNG-kaasua. Lämmin LNG-kaasu on kevyempää kuin kuivauksessa käytetty typpi. Kaasuttaminen aloitetaan päästämällä hitaasti tankin yläosaan LNG-kaasua, jolloin se kerrostuu kevyempänä typen päälle. LNG-kaasu käytännössä painaa pohjalla olevan typen tankin pohjatäyttöputkea pitkin pois tankista. Typpi voidaan ohjata esimerkiksi tuuletusmastosta ilmakehään. Tämän tyyppistä kaasuttamista kutsutaan englannin kielisellä termillä ”Piston flow method”. Tuuletusmaston metaanipitoisuutta tulee tarkailla kaasun havaitsimella. Jos ja kun mastosta tulee metaania typen lisäksi, on kaasuvirtaus syytä ohjata joko laivan omalle tai erilliselle polttimelle. Pääasia on, ettei metaania päästetä ilmakehään. (LiquifiedGasCarrier.com 2019).

Ennen nestemäisen maakaasun bunkrausta järjestelmä täytyy vielä jäähdyttää. Tämä tapahtuu päästämällä hitaasti kylmää LNG:tä tankkeihin. Liian nopea jäähdytys voi aiheuttaa materiaalin haurastumista ja pahimassa tapauksessa putken tai tankin halkeamisen. Jos nestemäinen maakaasu pääsee kosketuksiin lämpimän tankin kanssa, maakaasu höyrystyy nopeasti ja kerää tankkiin painetta. Höyrystyneen maakaasun hallinnan vuoksi täytyy nestemäistä maakaasua päästää tankkiin vain vähän kerrallaan. (Liquified-GasCarrier.com 2019).

Ensimmäistä kertaa järjestelmää täytettäessä, voi olla tarpeellista testata järjestelmän tiiveys kylmänä. Järjestelmä voidaan jäähdyttää nestemäisellä tyypellä ennen kaasuttamisvaihetta. Näin toimiessa, minimoidaan mahdollisten vuotojen aiheuttamat vahingot.

6.3 Bunkraus

Bunkraus tarkoittaa laivan polttoainesäiliöiden täydentämistä. Nestemäistä maakaasua voidaan bunkrata kolmella eri tavalla. Suoraan LNG-terminaalista, LNG-säiliörekasta tai LNG-täyttöaluksesta. SFS-EN ISO 20519:2017 standardi koskee LNG-bunkrausta. IGF- ja IGC-koodit määrittelevät aluksille vaatimuksia ja SCTW-koodi määrittelee henkilöstölle vaatimuksia.

LNG-bunkrausjärjestelmässä tulee olla hätäirroitusjärjestelmä (ERS), joka on liitetty hätäsammutusjärjestelmään (ESD). ESD-linkki eli yhteys ESD-järjestelmään tulee olla toimittavalla osapuolella ja vastaanottavassa aluksessa. ERS irroittaa tai katkaisee LNG-

siirtolinjan hätätilanteessa. Esimerkiksi, jos alukset ajautuvat erilleen, ERS aktivoituu ennen kuin siirtoletku hajoaa. ERS-järjestelmässä on venttiilit, jotka menevät kiinni ja näin ollen estävät LNG:n vapautumisen ilmakehään. ESD-järjestelmä tulee olla laukaistavissa manuaalisesti ja sen tulee myös laukaista automaattisesti hätätilanteessa. Hätätilanteita voi olla esimerkiksi LNG-tankin ylitäyttö tai palo- tai kaasuhälytys. (SFS-EN ISO 20519:2017, 5.4) ESD-järjestelmän lauetessa, menee molemmista päistä järjestelmää ESD-venttiilit kiinni ja tämä tarkoittaa, että siirtoletkuun jää nestemäistä maakaasua loukkuun. Tämä mahdollisuus tulee ottaa huomioon bunkrauksen alkupalaverissa.

Ennen bunkrausta vastuussa olevien henkilöiden tulisi pitää tapaaminen. Tapaamisessa tulisi ainakin tehdä riskianalyysi, sopia viestintätavasta, määritellä turva-alueet, keskustella samanaikaisista operaatioista ja sopia toimitettavan polttoaineen määrä ja laatu. Polttoaineen toimittajan ja vastaanottavan aluksen vastuuhenkilöiden tulisi tehdä myös bunkraussuunnitelma, joka sisältää muun muassa ohjeita hätätilanteessa toimimiseen, bunkrauksen aika ja paikka sekä tarvittavat toimintatestit järjestelmälle.

SFS-EN ISO 20519:2017 standardista löytyy valmiit pohjat vaadituille tarkastuslistoille.

6.3.1 Säiliöautosta alukseen bunkraus (TTS)

Tyypillinen bunkrausnopeus säiliöautosta on noin 40–60 m³/h. Alhaisen bunkrausnopeuden ja pienen säiliömäärän (50–100 m³) takia säiliöautosta bunkraus on melko epäkäytännöllinen vaihtoehto. Kuitenkin usein ensimmäinen bunkraus suoritetaan säiliöautosta. Säiliöautosta bunkraus tuo joustavuutta bunkrauspaikalle. Säiliöautosta bunkraus mahdollistaa myös lyhyen bunkrausletkun, joka taas pienentää lämmön siirtymistä LNG:hen ja pienentää nestemäärää, joka voi jäädä letkuun loukkuun hätätilanteessa. (EMSA 2018)

6.3.2 Aluksesta alukseen bunkraus (STS)

LNG-bunkrausaluksessa tilavuus on usein paljon suurempi kuin säiliöautossa, tyypillisesti noin 100–6 500 m³. Myös bunkrausnopeus saadaan suuremmaksi, tyypillisesti noin 500–1 000 m³/h. Aluksesta bunkraus tuo myös joustavuutta, sillä bunkraus voidaan tehdä satamassa, ankkuroituna tai jopa merellä. Aluksesta bunkratessa alukset tulee

kiinnittää toisiinsa tukevasti, ettei alukset pääse erkanemaan toisistaan. Aluksesta bunkraus on suosituin bunkraustapa varsinkin aluksilla, jotka viipyvät vain vähän aikaa satamassa. (EMSA 2018) Tämä voi kuitenkin muuttua, kun LNG-terminaalit yleistyvät.

6.3.3 Terminaalista alukseen bunkraus (PTS)

Terminaalissa on varastoituna reilusti LNG:tä, tyypillisesti tilavuus on 500–20 000m³. Bunkrausnopeus terminaalista on noin 1 000–2 000m³/h. (EMSA 2018) Kaikkiin aluksiin ei pystytä välttämättä hyödyntämään täyttä bunkrausnopeutta, sillä aluksilla on rajoituksia bunkrausnopeudelle. Nämä rajoitukset liittyvät esimerkiksi boil-off-kaasun hallintaan ja putkiston kokoon.

7 YHTEENVETO

Vaikka nesteytetyn maakaasun käsittely sisältää paljon riskejä, oikein käsiteltynä nesteytetty maakaasu on turvallinen polttoaine. Historia tuntee vähän LNG-järjestelmästä aiheutuneita vakavia onnettomuuksia. Järjestelmälle asetetut vaatimukset ovat tiukat, mutta niitä noudattamalla ja henkilökunnan pätevyydellä pysyvät jatkossakin LNG-järjestelmästä aiheutuneiden onnettomuuksien määrät pieninä.

Nesteytettyä maakaasua mainostetaan julkisuudessa puhtaana polttoainevaihtoehtona, mutta on hyvä pitää mielessä, että maakaasu on kuitenkin fossiilinen polttoaine ja tavoitteena olisi pyrkiä fossiilisista polttoaineista eroon. Laskennallisesti maakaasun polttaminen tuottaa hiilidioksidia vähemmän mitä esimerkiksi raskaan polttoöljyn polttaminen, mutta olisi syytä selvittää polttoaineiden kokonaisvaikutus ilmastoon lämpenemiseen aina maaperästä pumppaamisesta polttoaineen polttamiseen asti. Kuljetuksesta aiheutuvat päästöt, mahdolliset laitteistovuodot ja moottoreiden läpi pääsevät palamattomat hiilivedyt muodostavat myös kasvihuonepäästöjä.

Kuitenkin paikallisia päästöjä vertaillen maakaasu on huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin polttoöljyn polttaminen. Siirtyminen perinteisistä polttoaineista maakaasun polttamiseen on hyvä suunta, mutta ei pidä ajatella, että se olisi lopullinen ratkaisu.

Laiva- ja lentoliikenne ei varmasti pitkään aikaan tule siirtymään pelkällä sähköllä kulkeviksi, vaan niissä tarvitaan vielä pitkään nestemäisiä polttoaineita tarvittavan energiamäärän saavuttamiseksi. Tähän mahdollinen hiilineutraali ratkaisu voi kuitenkin löytyä biopolttoaineista tai synteettisesti valmistetuista polttoaineista. Nesteytetylle maakaasulle rakennetut alukset ja infrastruktuuri soveltuvat myös biometaanille ja synteettiselle metaanille, joten investoinnit LNG-infrastruktuuriin tulevat varmasti myös osaltaan lisäämään intressejä panostaa edellä mainittujen uusiutuvien polttoaineiden kehitykseen.

Kiinnostavaa nähdä kuinka suuren osan polttoaineista biopolttoaineet tulevat korvaamaan tulevaisuudessa. Kiinnostavaa nähdä myös, että kuinka energiatehokkaasti pystytään valmistamaan synteettistä metaania ja pystytäänkö sillä korvaamaan tulevaisuudessa meriliikenteen fossiiliset polttoaineet. Polttokennoteknologian ja vedyn energiatehokkaan eroittamisen myötä myös vedyn käyttö polttoaineena voi lisääntyä. Mielenkiinnolla odotankin ICON-risteilijöiden valmistumista, jotta pääsee näkemään minkälaisessa mittakaavassa polttokennoja pystytään hyödyntämään.

Lähteinä työssä on käytetty laajasti eri osapuolien tietoa. Lähteistä löytyy muun muassa riippumatonta tutkimustietoa, laitevalmistajien teknistä tietoa, verkkoartikkeleita ja koulutusmateriaalia. Luotettavaa tietoa aiheesta löytyy runsaasti englannin kielellä.

Työtä aloittaessa aihe oli itselleni kohtalaisen uusi, mutta erittäin mielenkiintoinen. Työn ohella omaksuin paljon uutta tietoa vaihtoehtoisista polttoaineista ja laiveteollisuudesta. Nesteytetyn maakaasun käyttö polttoaineena on aiheena erittäin laaja ja olisi ollut syytä rajata aihetta enemmän. Kuitenkin lopputuloksena valmistui kohtalaisen lyhyt tiivistelmä, johon on mahdutettu keskeisimmät asiat LNG-käyttöisestä risteilijästä. Työstä jäi uupumaan katsaus LNG-infrastruktuuriin. Seuraavia tutkimusaiheita voisi olla esimerkiksi polttokennojen hyödyntäminen risteilyaluksessa ja synteettisen metaanin energiatehokas valmistaminen.

LÄHTEET

AGA = American Gas Association 2019a. What is natural gas? Viitattu 12.9.2019. https://www.aga.org/natural-gas/energy-education_

AGA (Member of the Linde group) 2019b. Kryogeenisten nesteiden turvaohjeet. Viitattu 13.9.2019. https://www.aga.fi/fi/safety_health_ren/cryogenic_liquid_safety/index.html.

Bakas, I. 2015. Propulsion and power generation of LNG driven vessels. Environmental Protection Engineering S.A. Diaesitys. Viitattu 7.11.2019. <https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2015/10/Marine-Engines-running-on-LNG-for-submission-loannis-Bakas.pdf>.

Bubbico, R. & Salzano, E. 2008. Acoustic analysis of blast waves produced by rapid phase transition of LNG released on water. Viitattu 24.9.2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.07.033>.

Bureau Veritas Finland 2019. Laivojen ja meriteknisten rakenteiden luokitus. Viitattu 25.9.2019. https://www.bureauveritas.fi/services+sheet/laivojen_ja_meriteknisten_rakenteiden_luokitus.

Cameron LNG 2018. Natural gas and liquefaction process. Viitattu 19.11.2019 <https://cameronlng.com/wp-content/uploads/2018/10/Natural-Gas-and-the-Liquefaction-Process-CLNG.pdf>.

CGT = Compressed Gas Technologies Inc. 2019. Nitrogen generators How it works. Viitattu 8.11.2019. <https://nitrogen-generators.com/nitrogen-generators-how-it-works/>.

Cryonorm 2019. LNG vaporizers. Viitattu 13.11.2019. <https://www.cryonorm.com/lng-vaporizers>.

Dalakis, D. 2019. Effective fire-fighting strategies for LNG during bunkering. World Maritime University. Luentomateriaali. Viitattu 7.11.2019. <https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2015/09/PRESENTATION-1---EFFECTIVE-FIRE-FIGHTING-STRATEGIES-FOR-LNG-DURING-BUNKERING.pdf>.

DBFZ = Deutsches Biomasseforschungszentrum 2015. IEA Bioenergy task 37: Country Report Germany. Viitattu 19.11.2019. <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html>.

DNV GL 2019a. Current price development oil and gas. Viitattu 25.11.2019. <https://www.dnvgl.com/news/sulphur-limit-in-ecas-increased-risk-of-psc-deficiencies-and-detentions-142911>.

-2019b. Sulphur limit in ECAs. increased risk of PSC deficiencies and detentions. Viitattu 19.11.2019. <https://www.dnvgl.com/news/sulphur-limit-in-ecas-increased-risk-of-psc-deficiencies-and-detentions-142911>.

EIA = U.S. Energy Information Administration 2019. Units and calculations explained. Viitattu 21.11.2019. <https://www.eia.gov/energyexplained/units-and-calculators/british-thermal-units.php>.

EIGA = European Industrial Gases Association (2018). Cryogenic vaporization systems – prevention of brittle fracture of equipment and piping. Viitattu 1.11.2019. <https://www.eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=2544&token=93f7e2dde5f32c7be6cbc2ec3990d3f9f12d5739>.

EMSA = European Maritime Safety Agency 2018. Guidance on LNG Bunkering to port authors and administrations. Viitattu 14.11.2019. <https://www.parismou.org/sites/default/files/EMSA%20Guidance%20on%20LNG%20Bunkering.pdf>.

Energialalous 2018. Biokaasun tuotanto Suomessa etenee vaikeuksista huolimatta. Viitattu 19.11.2019. <http://www.energiatalous.fi/?p=2234>.

EPA = United States Environmental Protection Agency (2017): Understanding Global Warming Potentials. Viitattu 19.9.2019. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.

Earthworks 2019. Hydraulic Fracturing 101. Viitattu 30.10.2019. https://earthworks.org/issues/hydraulic_fracturing_101/ .

Gasum 2019. LNG. Puhdasta energiaa Pohjoismaihin. Viitattu 11.9.2019. <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/lng/>.

GIE = Gas infrastructure Europe (2012). Methane number position paper. Viitattu 24.10.2019. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwiro47nbTIAhWpxMQBHRFjAPMQFjABegQIChAE&url=https%3A%2F%2Fwww.gie.eu%2Findex.php%2Fgie-publications%2Fposition-papers%2F19528-gie-position-on-including-methane-number-in-eu-standard-for-natural-gas%2Ffile&usq=AOvVaw1Wijl_nplL3Cj2xCt7C69.

Hazen and Sawyer 2009. Final impact assesment report. Impact Assessment of Natural Gas Production in the New York City Water Supply Watershed. Viitattu 29.10.2019. https://earthworks.org/issues/hydraulic_fracturing_101/#FOOTNOTE1.

IEA 2019. Member Country Reports. Viitattu 19.11.2019. <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html>.

IGF code. International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels. Viitattu 21.10.2019. <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-%28MSC%29/Documents/MSC.391%2895%29.pdf>.

IGU = International Gas Union (2019) . World LNG report. Viitattu 28.10.2019. https://www.igu.org/sites/default/files/node-news_item-field_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf.

IMO = International Maritime Organization 2015. Gas and low-flashpoint fuels code adopted by IMO. Viitattu 20.9.2019. <http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/26-MSC-95-ENDS.aspx>.

-2019a: Brief History of IMO. Viitattu 20.9.2019. <http://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>.

-2019b. IGC Code. Viitattu 19.11.2019. <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Cargoes/CargoesInBulk/Pages/IGC-Code.aspx>.

-2019c: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Viitattu 25.9.2019. [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx).

-2019d. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. Viitattu 17.9.2019. [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx).

-2019e. Nitrogen Oxidies (NOx) – Regulation 13. Viitattu 19.11.2019. [http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)—Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)—Regulation-13.aspx).

-2019f. Sulphur 2020. Cutting Sulphur oxide emissions. Viitattu 11.9.2019. <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx>.

Jääskeläinen, H. 2019. Natural gas engines. Viitattu 6.11.2019. https://www.dieseln.net.com/tech/engine_natural-gas.php.

Karlsson, S. & Högnabba, T. & Kuusisaari, M. 2013. The Wärtsilä Gas Valve Unit Enclosed Design (GVU-ED™) for marine applications. Verkkoartikkeli. Viitattu 8.11.2019. <https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/the-wartsila-gas-valve-unit-enclosed-design-gvu-ed-for-marine-applications>.

Kinnunen, V. & Rintala, J. 2015. BIOKAASUTEKNOLOGIA. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu

Kondash, A. & Lauer, N. & Vengosh, A. 2018. The intensification of the water footprint of hydraulic fracturing. Verkkoartikkeli. Viitattu 29.10.2019. <https://advances.sciencemag.org/content/4/8/eaar5982>.

Kraack, M. 2015. LNG Infrastructure and shipbuilding. GO LNG. Final Conference to the SBSR Project „MarTech LNG“. Marine Service GMBH diaesitys. Viitattu 5.11.2019. http://www.golng.eu/files/Main/final_conference/MTLNG%20Infrastructure%20and%20shipbuilding.pdf.

Kuokkanen, M. & Kolppanen, R. & Kuokkanen, T. 2019. Nesteiden ja kiinteiden aineiden lämpöarvojen määrittäminen. Viitattu 25.10.2019. http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/ekopelletti_info_220611.pdf.

Kymäläinen, M. 2015. BIOKAASUTEKNOLOGIA. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu

Lampinen, A. 2009. Uusiutuvan liikenne-energian tiekartta. Tampere: Pohjois-Karjalan ammattikorkeakoulu. Saatavilla myös: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/127014/B17_Lampinen_verkkoversio_suojattu.pdf?sequence=1.

Ligterink, N. 2013. Vapor pressure of methane. Viitattu 8.11.2019. https://www.researchgate.net/figure/The-vapour-pressure-above-liquid-methane-is-a-function-of-the-temperature-only_fig1_303809881.

Luostarinen, S. 2015. BIOKAASUTEKNOLOGIA. Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen. Hämeenlinna: Hämeen ammattikorkeakoulu

Motiva 2019. Polttokennoautot. Viitattu 20.11.2019. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/polttokennoautot.

Nakilat 2018. Our fleet. Viitattu 28.10.2019. <https://www.nakilat.com/our-fleet/>.

Nature 2019. Methane leaks erode green credentials of nature gas . Viitattu 19.9.2019. <https://www.nature.com/news/methane-leaks-erode-greencredentials-of-natural-gas-1.12123#/ref-link-5>.

Nygård, B. 2016. Boil-off gas handling onboard LNG fuelled ships. Verkkoartikkeli. Viitattu 8.11.2019. <https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/boil-off-gas-handling-onboard-lng-fuelled-ships>.

Outokumpu Stainless Oy 2012. Program för miljökonsekvensbedömning av LNG-terminal. Viitattu 28.10.2019. <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B5BA7071D-C83E-461A-A149-9D980EB5C0D1%7D/44028>.

Safety4Sea 2019. Number of ships using LNG, scrubbers to increase from 2020. Viitattu 28.10.2019. <https://safety4sea.com/number-of-ships-using-lng-scrubbers-to-increase-from-2020/>.

SCTW ASETUS 1984. Kansainvälinen merenkulkijoiden koulutusta, pätevyyskirjoja, ja vahdinpitoa koskeva vuoden 1978 yleissopimus. Viitattu 21.10.2019. <https://www.finlex.fi/fi/sopimukset/sopsviite/1984/19840022>.

SFS-EN ISO 16903. 2015. Petroleum and natural gas industries. Characteristics of LNG, influencing the design, and material selection. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 60079-10-1. 2015. Räjähdyksivaaralliset tilat. Osa 10-1: Tilaluokitus. Kaasuräjähdyksivaaralliset tilat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS

Smil, V. 2019. Maakaasu. Kohti kestävämpää energiataloutta. Suom. P. Ranta. Tallinna: Gaudiamus Oy

Soletair 2019. Technical specifications. Viitattu 6.11.2019. <https://soletair.fi/technical-specifications/mobile-synthesis-unit/>.

Suomen kaasuyhdistys 2014. Maakaasun käsikirja. Viitattu 11.9.2019. <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/maakaasun-kasikirja/>.

-2019: LNG asiakassäiliöt. Viitattu 19.9.2019. <https://www.kaasuyhdistys.fi/julkaisut/lng-asiakas-sailiot/>.

TRAFICOM 2019a. Ajoneuvoveron rakenne ja määrä. Viitattu 19.11.2019. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/ajoneuvoveron-rakenne-ja-maara>.

-2019b. Merenkulun lisäpätevyystodistukset. Viitattu 17.9.2019. <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/merenkulku/merenkulun-lisapatevyystodistukset>.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Jätetilasto [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-3339. 13 2017. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu: 13.11.2019. https://www.stat.fi/til/jate/2017/13/jate_2017_13_2019-01-09_tie_001_fi.html.

Unitrove 2019. Compressed natural gas. What is CNG? Viitattu 19.9.2019. <https://www.unitrove.com/engineering/gas-technology/compressed-natural-gas>.

U.S Department of Energy 2019. Gas hydrates R&D Program. Viitattu 22.10.2019. <https://www.energy.gov/fe/science-innovation/oil-gas-research/methane-hydrate>.

U.S. Energy Information Administration 2018. Natural gas explained. Viitattu 12.9.2019. <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>.

-2019. Frequently Asked Questions. Viitattu 12.9.2019. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=73&t=11>.

Wärtsilä 2019a. LNG tanker. Viitattu 28.10.2019. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/lng-tanker>.

-2019b. Wärtsilä Cargo Handling for small LNG Carriers. Viitattu 28.10.2019. <https://www.wartsila.com/marine/build/gas-solutions/gas-cargo-handling-systems/cargo-handling-for-small-lng-carriers>.

-2019c. 46DF Product guide. Viitattu 24.10.2019. https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/df-engine/product-guide-o-e-w46df.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dfengines&utm_term=w46df&utm_content=productguide&utm_campaign=msleadscoring.

2014/90/EU Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. Viitattu 21.10.2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1571657355451&uri=CELEX:32014L0090>.

Taulukko 7. Keskeisiä standardeja ja ohjeistuksia LNG- alukselle

EN 1149-5	Suojavaatetuksen sähköstaattiset ominaisuudet
IEC 60092-502	Laivan sähköasennukset
ISO 20088	Eristysmateriaalien kryogeenisen vuodon kestävyys
ISO/TS 16901	LNG-laitoksen riskien arviointi
ISO/TS 18683	LNG-aluksen polttoainejärjestelmä ja asennukset
SFS-EN 12308	LNG-putkiston laippaliitosten tiivisteiden testaus
SFS-EN 12838	LNG:n näytteenottojärjestelmien testaus
SFS-EN 16726	Maakaasun laatuvaatimukset
SFS-EN 60079-0	Räjähdyksivaaralliset tilat: laitteiden yleiset vaatimukset
SFS-EN 60079-10-1	Kaasuräjähdyksivaarallisten tilojen tilaluokitus
SFS-EN 60079-10-2	Pölyräjähdyksivaarallisten tilojen tilaluokitus
SFS-EN 60079-14	Räjähdyksivaarallisten tilojen sähköasennukset
SFS-EN ISO 16903	LNG:n ominaisuudet ja kryogeeniset materiaalit
SFS-EN ISO 20519	LNG:n bunkraus
IMO MSC.285	Interim guidelines on safety for natural gas-fuelled engine installations in ships
IMO IGF-code	International code of safety for ship using gases or other low-flashpoint fuels
IMO IGC-code	International code of the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk
SIGGTO	Liquefied gas fire hazard management
SIGTTO	Liquefied gas handling principles on ships and in terminals
SIGTTO	Prevention of rollover in LNG ships
SIGTTO	Ship to ship transfer guide for petroleum, chemicals and liquefied gases
EN 1149-5	Suojavaatetuksen sähköstaattiset ominaisuudet
IEC 60092-502	Laivan sähköasennukset