

Juho Väisänen

# Nesteytetyn maakaasun soveltuvuus poltto- aineeksi Volvo Penta -merimoottorissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

29.8.2018

Tekijä Otsikko	Juho Väisänen Nesteytetyn maakaasun soveltuvuus polttoaineeksi Volvo Penta -merimoottorissa
Sivumäärä Aika	33 sivua 29.8.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Lehtori Pekka Salonen
<p>Insinööriä tehtiin Metropolia Ammattikorkeakoululle ja toteutettiin yhteistyössä laivaristeily-yritys Royal Line Oy:n kanssa. Työn tarkoituksena oli tutkia dieselkäyttöisen Volvo Penta -merimoottorin soveltuvuutta käytettäväksi nesteytetyllä maakaasulla.</p> <p>Työssä tutkittiin yleisesti kahden eri kaasun ominaisuuksia sekä hyötyjä polttoaineena. Hankittujen tietojen perusteella sekä nykyisten kaasumoottoreiden pohjalta tutkittavaksi polttoaineeksi valittiin maakaasu sekä erityisesti sen nesteytetty olomuoto.</p> <p>Työssä käsiteltiin kaasun ominaisuuksia sekä sen yleistä soveltuvuutta nykyiseen meriliikenteeseen turvallisuuden, logistiikan, tehokkuuden sekä kustannusten puolesta. Työssä käytetty materiaali pohjautui alalla yleisesti operoivien yritysten ja henkilöiden tutkimuksiin sekä lausuntoihin. Aineistona käytettiin myös alaan liittyvää kirjallisuutta, tutkimustuloksia sekä tutkimuskohteena toimivan moottorin manuaaleja ja materiaaleja.</p> <p>Insinööriä tuloksista voitiin todeta nesteytetyn maakaasun haasteet sekä kehityskohteet polttoaineena. Teoreettisena tutkimustuloksena voitiin todeta nesteytetyn maakaasun soveltuvan erittäin hyvin merimoottoreiden polttoaineeksi.</p> <p>Maakaasu vaatii kuitenkin nykyään päivänä mittavaa kehitystä niin infrastruktuurinsa kuin käyttöönottonsa puolesta. Tutkimuksista voitiin päätellä, että maakaasun käyttöönotto keskiuudessa aluksessa ei ollut vielä tänä päivänä kustannustehokasta haasteellisen logistiikan sekä kohtalaisen laajojen sekä kalliiden investointiensä vuoksi.</p>	
Avainsanat	Nesteytetty maakaasu, LNG, Volvo Penta

Author Title	Juho Väisänen LNG as an alternative fuel for Volvo Penta marine engine
Number of Pages Date	33 pages 29 August 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Pekka Salonen, Senior Lecturer
<p>This bachelor's thesis was made for Metropolia University of Applied Sciences. The research was carried out in collaboration with the marine company Royal Line Oy. The purpose of thesis was to examine how liquefied natural gas could comport as an alternative fuel for Volvo Penta marine engine.</p> <p>The thesis shows an overview of biogas and liquefied natural gas and its benefits and features and provides an explanation for why it could be used as an alternative fuel in diesel marine engine. This report focuses on natural gas in its liquid form.</p> <p>This report also reviews liquefied natural gas as a fuel and evaluates its safety, logistics and costs. The research is based on literature of marine business, various internet sources, engine manuals and statements from people working in the marine industry.</p> <p>The results show challenges and requirements for further development of liquefied natural gas as a marine fuel. However, as a theoretical result it was established that liquefied natural gas has notable potential as a marine fuel due to its features.</p> <p>Even so, the use of liquefied natural gas still needs extensive development mainly in infrastructure and application phases. The results show that the use of natural gas in middle-sized vessels is still not cost-effective because of insufficient logistics and relatively expensive investments.</p>	
Keywords	LNG, Liquefied natural gas, Volvo Penta

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Biokaasu	2
2.1	Biokaasun yleiset edut	3
2.2	Ominaisuudet	3
2.2.1	Metaani	4
2.2.2	Hiilidioksidi	5
2.3	Tuotanto	6
3	Maakaasu	7
3.1	Maakaasun yleiset edut	7
3.2	Ominaisuudet	8
3.3	Nesteytetty maakaasu	10
4	Maakaasun käyttö meriliikenteen polttoaineena	10
5	Volvo Penta -merimoottorit	13
5.1	D12 D-MH 550	13
5.2	Järjestelmän muutostyö	15
5.3	Aluksen rakenteisiin vaadittavat muutokset	15
5.4	Dual fuel -moottori	18
5.5	Vaihtoehtoinen moottori	20
6	Muutostyön haasteet	22
6.1	Polttoainevuoto	22
6.2	Rollover-reaktio	23
6.3	BLEVE-räjähdykset	23
6.4	IGF-koodi ja koulutus	24
7	Kaasu tulevaisuudessa	25
8	Yhteenveto	27
	Lähteet	29

## Lyhenteet

BLEVE	Boiling liquid expanding vapour explosion
BOR	Boil-off rate
CARB	California air resources board
CCH	Crossflow cylinder head
CNG	Compressed natural gas
DFNG	Dual fuel natural gas
DING	Direct injection natural gas
EMS	Engine management system
EPA	Environmental Protection Agency
IGC	International Code of the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk
IGF	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flash-point Fuels
IMO	International Maritime Organization
LHV	Lower heating value
LNG	Liquefied natural gas

MGO	Marine gas oil
SCR	Selective catalytic reduction
SING	Spark ignition natural gas

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on selvittää nesteytetyn maakaasun ominaisuuksia ja turvallisuustekijöitä meriliikenteen polttoaineena sekä soveltuvuutta vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi Volvon dieselkäyttöisiin Penta-merimoottoreihin. Muutostyön tutkimuskohteeksi valittiin Volvo Penta D12 D-MH 550, dieselkäyttöinen sisämoottori. Moottori oli käytössä kotimaan liikenteen aluksessa, jolla myös tämän insinööriyön tekijä on työskennellyt vuodesta 2015. Tästä syystä tutkimuskohde oli jo entuudestaan tuttu ja näin sopiva tutkimuskohde tähän opinnäytetyöhön.

Nesteytetyn maakaasun (*liquefied natural gas* eli LNG) käyttö meriliikenteen polttoaineena on yleistynyt viime vuosikymmenien aikana. Sen käyttö pääsijaisena polttoaineena on vakiintunut erityisesti raskaassa meriliikenteessä, johon voidaan sisällyttää rahtiliikenne, risteilijät sekä offshore-tukialukset. Tämänhetkisten arvioiden mukaan puolet Itämerellä operoivista aluksista on siirtymässä käyttämään nesteytettyä maakaasua polttoaineenaan vuoteen 2030 mennessä.

Tiukentuvat päästörajoitukset sekä moottoreiden energiatehokkuuden kasvattaminen ajaa varustamoita sekä yrityksiä kehittämään uusia ratkaisuja täyttämään tämänhetkiset ympäristö- ja kilpailuvaatimukset. Maakaasun yleistymistä pidetään yhä yhtenä varteentotettavimmista vaihtoehdoista myös pienten ja keskisuurten alusten polttoaineeksi. Maakaasun keskeisinä etuina pidetään sen kemiallisia sekä fysikaalisia ominaisuuksia öljypohjaisiin polttoaineisiin verrattuna. Uuden polttoaineen myötä päästörajoituksiin on entistä helpompi päästä, mutta tämä tuo samalla suuria vaatimuksia aluksien rakenteellisiin muutoksiin sekä kustannuksia miehistön koulutukseen.

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia Volvo Penta -merimoottorin soveltuvuutta käytettäväksi nesteytetyllä maakaasulla keskiraskaassa meriliikenteessä. Työssä tutkittiin nesteytetyn maakaasun ominaisuuksia, ympäristövaikutuksia, energiatehokkuutta sekä mahdollisia riskitekijöitä. Työssä selvitettiin myös maakaasun osuutta meriliikenteen polttoaineena nykypäivänä, sekä käytiin läpi mahdollisia konemuutoksia, joita tarvitaan nesteytetyn maakaasun käyttämiseksi polttoaineena nykyisessä dieselmoottorissa. Maakaasun käytöstä polttoaineena työn tekijällä ei ollut aikaisempaa kokemusta, ja insinööriyö aloitettiin keräämällä tarvittava aiheeseen liittyvä materiaali ja tutustumalla

tarkoin siihen. Työn alkuvaiheessa pyrittiin myös rajaamaan aihealue, jotta työssä voitiin perehtyä juuri maakaasun ominaisuuksiin polttoaineena.

Tässä insinööriyössä käsitellään myös biokaasun ja maakaasun ominaisuuksia sekä yleisiä hyötyjä, maakaasun soveltuvuutta meriliikenteen polttoaineeksi sekä muutostyössä huomioon otettavia asioita niin turvallisuuden kuin lainsäädännön kannalta. Työssä tarkastellaan myös lähitulevaisuuden näkymiä sekä kaasun käytön haasteita ja kehityskohteita kustannustehokkaaksi polttoaineeksi meriliikenteessä.

## 2 Biokaasu

Biokaasu on kaasuseos, joka syntyy eloperäisen aineksen hajotessa hapettomissa olosuhteissa. Hajoaminen tapahtuu mädäntymällä anaerobisten eli hapettomassa tilassa elävien bakteerien vaikutuksesta. Prosessissa syntyy pääasiassa metaania hajoamistoiminnan tuloksena. Biokaasua muodostuu ja esiintyy luonnossa, mutta sitä voidaan myös valmistaa biokaasureaktoreissa ja kaatopaikoilla. Tuotettu biokaasu sisältää usein huomattavasti suurempia määriä typpeä ja happea kuin luonnossa esiintyvä biokaasu.

Biokaasu koostuu lähinnä metaanista ja hiilidioksidista, sekä pienistä määristä vesihöyryä, typpeä, happea, vetyä, ammoniakkia sekä rikkivetyä. Kaasun pitoisuudet riippuvat paljon sekä mädätettävästä biomassasta että mädätysprosessista. Soveltavuus energiakäyttöön perustuu siinä olevan metaanin määrään. Kaasu koostuu yleensä noin 50–70 %:sta metaania sekä hiilidioksidista, jota on vastaavasti noin 50–30 %. Loppujen ainesosien määrä biokaasussa on yleensä hyvin vähäinen, alle prosentin. Biokaasun tai metaanin määrä ilmoitetaan normaalikuutiolina. Normaalikuutiolla tarkoitetaan yhtä kuutiota normaalissa ilmanpaineessa ja 0 °C:n lämpötilassa. Lämpöarvo ilmoitetaan puolestaan jouleina massaa tai tilavuutta kohti. Biokaasun lämpöarvo (LHV) on keskimäärin 23 MJ/kg kohden.

(Bioste.fi 2018.)



## 2.1 Biokaasun yleiset edut

Biomassa ja siitä jatkojalostettu biokaasu ovat uusiutuvia energialähteitä. Tuotantoprosessissa hyödynnetään teollisuuden, maatalouden sekä kotitalouksien jätteitä. Biokaasun tuotannosta syntyvä orgaaninen aines voidaan hyödyntää tehokkaasti maatalouden kierrätyslannoitteena. Sivutuotteena syntyvä orgaaninen aines vastaa lannoitusominaisuuksiltaan keinolannoitteita. Tuotetun biokaasun valmistukseen voidaan käyttää lähes mitä tahansa biohajoavaa materiaalia, poissulkien selluloosan valmistukseen käytettävän ligniinipitoisen puun.

Biokaasun tuotanto ei ole myöskään riippuvainen ulkopuolisista tekijöistä, joten sen tuotannolla on positiivinen vaikutus Suomen energiantuotannon omavaraisuuteen sekä kiertotalouteen. Suomen biokaasulaitoksien tuotanto on noin 10 TWh vuodessa. Määrä vastaa noin miljoonan kaasuauton käyttötarvetta. Biokaasun tuotanto on paikallista, eikä sen hinnoittelu ole sidoksissa öljyyn tai muihin fossiilisiin polttoaineisiin. Se on energialähteenä myös monimuotoinen, ja sitä voidaan hyödyntää polttoaineena liikennepolttoaineen lisäksi lämmön- ja sähköntuotannossa sekä teollisuudessa. (Gasum 2018.)

Biokaasu on energialähteenä erittäin puhdas polttoaine, ja siitä syntyvät kasvihuonepäästöt ovat noin 90 % pienemmät verrattuna bensiiniin sekä dieselöljyyn. Biokaasu on myös turvallinen polttoaine mahdollisen onnettomuuden tai vuototilanteen tapahtuessa. Se on huomattavasti ilmaa kevyempää, joten mahdollisessa vuototilanteessa se haihtuu tehokkaasti ilmaan eikä sitoudu maaperään tai vesistöihin. Biokaasun syttymiseen tarvitaan ilmaa suhteessa 5–15 %, joten se on erittäin vaikeasti syttyvä eikä onnettomuustilanteessa aiheuta räjähdys- tai palovaaraa. Puhtaan metaanin itsesyttymislämpötila on myös erittäin korkea, noin 650 °C. Kuljetustarkoitukseen käytettävät polttoainesäiliöt ovat usein huomattavasti tukevampia ja kestävämpiä perinteiseen polttoainesäiliöön verrattuna, joten niiden repeytyminen tai muunlainen vaurioituminen on myös epätodennäköisempää onnettomuustilanteessa. (Green Reality 2018.)

## 2.2 Ominaisuudet

Biokaasun raaka-aineina voidaan käyttää helposti hajoavia orgaanisia yhdisteitä, kuten lantaa, elintarviketeollisuuden biojätteitä, viemäri lietettä, elintarviketeollisuuden jätevesiä sekä kasvibiomassaa. Biokaasun käyttö polttoaineena vaatii kaasun puhdistuksen

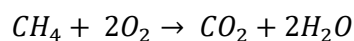
sekä paineistuksen. Biokaasun jalostuksen seurauksena sen metaanipitoisuus saadaan nostettua noin 98 %. Loput 2 % ovat pääasiassa etaania ja typpeä.

Jalostetusta biokaasusta käytetään nimitystä biometaani, ja se vastaa ominaisuuksiltaan maakaasua. Biokaasu on teoriassa polttoainekäyttöön sopivaa, kunhan sen metaanipitoisuus on yli 45 %. Tällöin biokaasu on syttyvää, etenkin jos sen sytytykseen käytetään erillistä pilot-polttoainetta. Energiasisältö polttoaineeksi ei ole kuitenkaan energia- tai kustannustehokasta alhaisella metaanipitoisuudella. (The Composition of Biogas 2018.)

### 2.2.1 Metaani

Metaani (CH<sub>4</sub>) on hajuton, väritön ja ilmaa kevyempi kaasu. Sitä syntyy kaikissa hapettomassa tilassa tapahtuvissa mädätysprosesseissa. Metaani on oikeassa tilanteessa ja ympäristössä helposti syttyvä ja hyvin palava kaasu, minkä vuoksi se soveltuu ominaisuuksiensa puolesta erittäin hyvin polttoaineeksi. Se on myös pelkistävä aine, mikä voi aiheuttaa räjähdysvaaran sen reagoiessa voimakkaiden hapettimien kanssa.

Metaani luokitellaan hiilidioksidin ohella kasvihuonekaasuksi, minkä vuoksi sen päästämistä ilmakehään tulee välttää. Voimassa olevien ympäristösäädösten perusteella sitä ei kuitenkaan luokitella ympäristölle vaaralliseksi kaasuksi. Metaanin tiheys on 0.072 kg/m<sup>3</sup> 15 °C ja yhden barin paineessa. Metaanin lämpöarvo on 55.5 MJ/kg. (Soetaert & Vandamme 2009: 174.) Metaani on mahdollista muuttaa syttymiskelvottomaksi lisäämällä ilmaan inerttikaasua, joka voi olla esimerkiksi typpeä. Inerttikaasua käytetään erityisesti huolto- ja kunnossapitotehtävien turvallisuuden varmistamiseksi. Metaanin palamisreaktio voidaan yksinkertaistaa kaavaan:



Metaanin palamistuotteina muodostuu hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>) ja vesihöyryä (H<sub>2</sub>O). Palamisreaktiossa vapautuu myös runsaasti lämpöenergiaa. Metaanin kiehumispiste on -161.5 °C. Tämän lämpötilan alapuolella metaani muuttuu nestemäiseen muotoon, jota käytetään erityisesti maakaasun kuljetuksessa sekä varastoimisessa. (Metaani 2018.)

## 2.2.2 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) on hiilestä ja hapestä koostuva hajuton ja väritön kaasu. Hiilidioksidia esiintyy maan ilmakehässä luontaisesti pieninä määrinä, minkä lisäksi sitä syntyy hiilipitoisten aineiden palamistuotteena. Hiilidioksidi on merkittävin niistä kasvihuonekaasuista, joilla on huomattava vaikutus ilmaston lämpenemiseen. Tämä johtuu sen ominaisuudesta päästää lävitseen näkyvää valoa, mutta absorboida lämpösäteilyä. (Hiilidioksidi 2018.)

Maakaasun hiilidioksidin päästökerroin on noin 56 kg/GJ (kuva 1). Vertailukohtana käytettävän kivihiilen hiilidioksidin päästökerroin on lähes puolet suurempi, noin 93 kg/GJ. (Ilmasto.org 2005.)

Polttoaine	Hiilidioksidin päästökerroin (kg/GJ)
Turve	104
Kivihiili	93
Raskas polttoöljy	77
Kevyt polttoöljy	74
Maakaasu	56

Kuva 1. Polttoaineiden hiilidioksidipäästöt (Ilmasto.org 2005).

Vaikka hiilidioksidia pidetään merkittävimpänä kasvihuonekaasuna, on metaani suhteessa huomattavasti vahvempi kasvihuonekaasu. Ilmakehässä ollessaan yksi metaanimolekyylillä lämmittää ilmastoa lähes sata kertaa tehokkaammin kuin yksi hiilidioksidimolekyylillä. Metaani kuitenkin hajoaa ajan myötä hiilidioksidiksi, minkä vuoksi sen ilmastoa kuormittava vaikutus riippuu ajallisesta perspektiivistä. 20 vuoden tähtäyksellä lasien metaani on noin 66 kertaa hiilidioksidia vahvempi kasvihuonekaasu. 100 vuoden tähtäimellä sen kasvihuonevaikutus hiilidioksidiin nähden on enää noin 15-kertainen. (Atmosmare.fi 2015.)

### 2.3 Tuotanto

Biokaasua tuotetaan eloperäisestä materiaalista, kuten biojätteestä, jätevesilietteestä, jätevesistä, lannasta sekä teollisuuden sivutuotteista. Biokaasun valmistus tapahtuu siihen tarkoitetuissa biokaasureaktoreissa, joissa eloperäinen aines hajoaa hapettomissa olosuhteissa mikrobien vaikutuksesta. Hajoamisen seurauksena syntyy kaasua, joka sisältää runsaasti puhdistamatonta metaania. (Biokaasuauto.fi 2018.)

Metaanipitoinen kaasu jalostetaan ja puhdistetaan liikennekäyttöön soveltuvaksi bioenergian biokaasulaitoksella. Biokaasun tuotanto on hyvin energiatehokas tuotantoprosessi, sillä samasta määrästä raaka-ainetta pystytään tuottamaan huomattavasti enemmän liikennebiokaasua kuin esimerkiksi bioetanolia tai biodieseliä. Biokaasua on mahdollista tuottaa myös biokaasureaktoreissa, joiden raaka-aineena toimii pääasiassa lietelanta. Reaktorissa liete hygienisoituu, ja tämän seurauksena kaasu pääsee nousemaan bioreaktorin yläosaan, josta se voidaan ottaa talteen ja varastoida kaasusäiliöihin. (Gasum 2018.)

Biokaasureaktoreista saatava biokaasu on metaanipitoisuudeltaan noin 60–65 % ja hiilidioksidi pitoisuudeltaan noin 30–35 %. Sitä voidaan sellaisenaan käyttää esimerkiksi lämmön ja sähkön tuotannossa. Jotta biokaasua voidaan käyttää liikennepolttoaineena, tulee sen metaanipitoisuuden olla yli 95 %. Tätä varten biokaasusta poistetaan hiilidioksidiä, korroosiota aiheuttavaa rikkivetyä sekä vettä. Tällä voidaan myös varmistaa polttoainelinjastojen sekä moottoreiden pidempi käyttöikä.

Biokaasun puhdistuksessa kaasu pestään. Prosessissa biokaasun metaani sekä hiilidioksidi erotellaan vesisäiliöissä toisistaan. Vesipesun aikana paine on noin 7–8 bar, jolloin hiilidioksidi ja rikkivety absorboituvat veteen. Veteen sitoutuneet kaasut vapautuvat paineen laskiessa. Viimeisessä puhdistusvaiheessa biometaani vielä kuivataan, minkä jälkeen se on käyttövalmista jakeluun. Biokaasun jalostuksen seurauksena se vastaa koostumukseltaan maakaasua, ja sitä voidaan kutsua liikennebiokaasuksi. (Biokaasuauto.fi 2018.)

### 3 Maakaasu

Maakaasu eli luonnonkaasu on hajuton ja väritön kaasu, joka koostuu suurimmaksi osaksi metaanista. Maakaasu on biokaasun tavoin syntynyt anaerobisen bakteeritoiminnan sekä maaperän lämmön vuorovaikutuksen seurauksena. Maakaasua saadaan usein öljyesiintymien läheisyydestä sekä liuskekivistä. Maakaasuesiintymiä sijaitsee maankuoressa maalla ja merenpohjassa. (Suomen Kaasuyhdistys 2010.)

Ennen teollista käyttöä maakaasu täytyy jalostaa maakaasun jalostuslaitoksessa, jossa siitä poistetaan muut yhdisteet paitsi metaani. Jalostuksen seurauksena maakaasusta poistuu etaania, propaania, butaania sekä muita raskaampia hiilivetyjä. Puhdistettu maakaasu omaa hyvän lämpöarvon, noin 50 MJ/kg kohden eli 10 kWh/n-m<sup>3</sup>. Kuutio puhdasta metaania vastaa lämpöarvonsa puolesta yhtä litraa polttoöljyä. Jalostetun maakaasun käyttökohteita ovat voimalaitoksien ja kulkuneuvojen polttoaine sekä kotitalouksien lämmitys. Maakaasu voidaan jatkojalostaa entisestään sekä nestemäiseen muotoon (LNG) sekä paineistettuun muotoon (CNG). (Conserve Energy Future 2018.)

#### 3.1 Maakaasun yleiset edut

Maakaasu on polttoaineena energiatehokasta, sillä sen siirtohäviöitä ja käyttösuhdetta pidetään yleisesti erittäin hyvänä. Sen ominaisuudet mahdollistavat näin korkean hyötysuhteen polttoaineena. Hyvien maakaasuvarantojen ansiosta sen hinta ei ole sidoksissa öljyn hintaan. Maakaasun hinta on pysynyt lähes samana viimeisen 20 vuoden aikana, se on noin kolmannes öljyn hinnasta. Vaikka hintaero öljyyn vaihtelee jonkin verran, oletetaan sen olevan tulevaisuudessakin huomattavasti edullisempi ja vakaampi hyvän saatavuutensa ansiosta.

Maailman maakaasuvannot ovat huomattavasti suuremmat öljyyn verrattuna ja siitä merkittävä osa on edelleen löytämättä eri puolilta maailmaa. Tästä syystä maakaasuvarantojen todellista määrää on mahdotonta arvioida. Tämän hetkisten tutkimusten perusteella uskotaan nykyisten maakaasuvarantojen riittävän vähintään 100–150 vuodeksi. Vertailukohtana voidaan pitää öljyvarantoja, joiden on ennustettu loppuvan seuraavan 40 vuoden aikana. (Union of Concerned Scientists 2018.)

Maakaasu palaa puhtaasti verrattuna kivihiileen ja öljyyn, sillä se ei sisällä rikkiä tai raskasmetalleja. Palamistuotteena ei synny myöskään tuhkaa kaasumaisen olomuodon ansiosta. Palamistuotteena syntyy kuitenkin hiilidioksidia, joskin huomattavasti vähemmän kuin öljyn ja kivihiilen palamistuotteena.

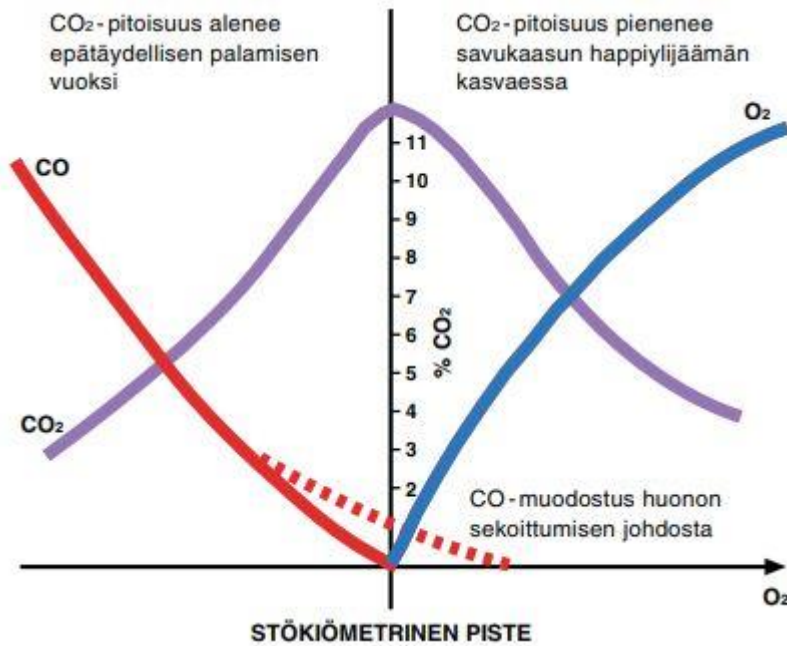
Nesteytettyä maakaasua on hyödynnetty pitkään energialähteenä, joten sen tuotantoon ja jalostukseen ovat kehittyneet vakiintuneet työmenetelmät, jotka tunnetaan erittäin hyvin. Tämän pohjalta voidaan kehittää entistä parempia teknisiä ratkaisuja myös tulevaisuudessa. Maakaasun infrastruktuuri onkin kehittynyt huomattavasti nopeammin muihin ”puhtaisiin” energialähteisiin verrattuna. (Nesteytetty Maakaasu 2018.)

### 3.2 Ominaisuudet

Maakaasun sisältämän metaanin kiehumispiste on  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , joten se esiintyy luonnossa kaasumaisessa muodossa. Kaasun suhteellinen tiheys ilmaan verrattuna on 0.56. Täydellisesti palaessaan jalostetun maakaasun metaani hapettuu hiilidioksidiksi sekä vesihöyryksi. Tällaiseen palamisprosessiin on kuitenkin kohtalaisen vaikea päästä. Metaanin palaessa epätäydellisesti palamistuloksena muodostuu hiilimonoksidia eli häkää. Häkä on hajuton ja erittäin myrkyllinen kaasu. Tästä syystä täydellisen palamisprosessin varmistaminen on tärkeää käytettäessä maakaasua polttoaineena.

Maakaasun laatu vaihtelee huomattavasti eri tuotantolähteissä. Venäjältä saatava maakaasu on keskimäärin noin 98 % metaania, kun taas Euroopasta saatava maakaasun metaanipitoisuus on ainoastaan 81 %. Korkea metaanipitoisuus tuotantovaiheessa helpottaa sen jatkojalostusta, mikä tekee siitä entistä kustannustehokkaampaa. (Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta 2018.)

Maakaasun palamistuotteena ei synny happamoittavia päästöjä, hiilivetyjä eikä haitallisia hiukkasia, joten sitä voidaan pitää vähiten vahingollisena fossiilisena polttoaineena. Metaanin suuren vetypitoisuuden takia palamistuloksena muodostuu kuitenkin runsaasti vettä. Metaani on palava kaasu, mutta sitä tulee olla sekoitettuna ilmaan 5–15 tilavuusprosenttia syttyäkseen. Metaanin itsesyttymislämpötila on ilmassa  $600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Yksi kuutiometri maakaasua tuottaa palaessaan noin 10 kWh lämpöenergiaa, jonka sivutuotteena muodostuu noin 1.6 kg vettä sekä 2 kg hiilidioksidia. Maakaasun täydellinen palaminen vaatii teoreettista määrää enemmän ilmaa (kuva 2).



Kuva 2. Maakaasun epätäydellinen palaminen (Suomen Kaasuyhdistys 2010).

Liian suuri yli-ilmamäärä heikentää palamishyötysuhdetta. Se on kuitenkin pienempi haitta kuin palaminen ali-ilmalla. Epätäydellisen palamisen seurauksena ali-ilmalla palamistuotteena muodostuu muun muassa häkää sekä palamatonta hiilivetyä. Tästä syystä palamistapahtuman happi- sekä häkäpitoisuuksia tulee seurata jatkuvasti, sillä häkää voi muodostua myös kaasun ja palamisilman huonon sekoittumisen seurauksena.

Hiilidioksidiarvojen perusteella ei voida myöskään suoraan päätellä, tapahtuuko palaminen ali- vai yli-ilmalla. Parhaaseen palamisen hyötysuhteeseen päästään käyttäessä yli-ilmaa. Metaanin teoreettinen palamisilma on noin  $9.8 \text{ m}^3$ . Parhaaseen hyötysuhteeseen päästään kertomalla teoreettinen ilmamäärä yli-ilmalla kertoimella, joka on yleensä noin 1.1. Jos käytössä ei ole savukaasujen happijäännökseen perustuvaa palamisilmamäärän säätöä, on suositeltavaa pitää ilmakerroin vähintään arvossa 1.2. (Suomen Kaasuyhdistys 2010.)

### 3.3 Nesteytetty maakaasu

LNG (*liquefied natural gas*) eli nesteytetty maakaasu on nestemäiseen olomuotoon jalostettua maakaasua. LNG on pääasiassa metaanista koostuva kirkas, väritön ja hajuton neste, joka sisältää myös pieniä määriä etaania, propaania ja butaania. LNG:tä hyödynnetään pääasiassa meriliikenteessä sekä raskaassa maantieliikenteessä. Polttoaineena nesteytetyllä maakaasulla on samat ominaisuudet kuin maakaasullakin.

Nesteytetty kaasu vaatii pienemmän tilavuuden sekä mahdollistaa tehokkaan kuljetuksen ja varastoimisen. LNG soveltuu hyvin polttoaineeksi sen helpon varastoimisen sekä energiatihedyn ansiosta, joka mahdollistaa hyväksyttävät polttoainesäiliöt sekä tankkausvälit. LNG omaa saman suorituskyvyn kaikissa käyttökohteissa ja ympäristöissä kuin kaasumaisessa olomuodossakin.

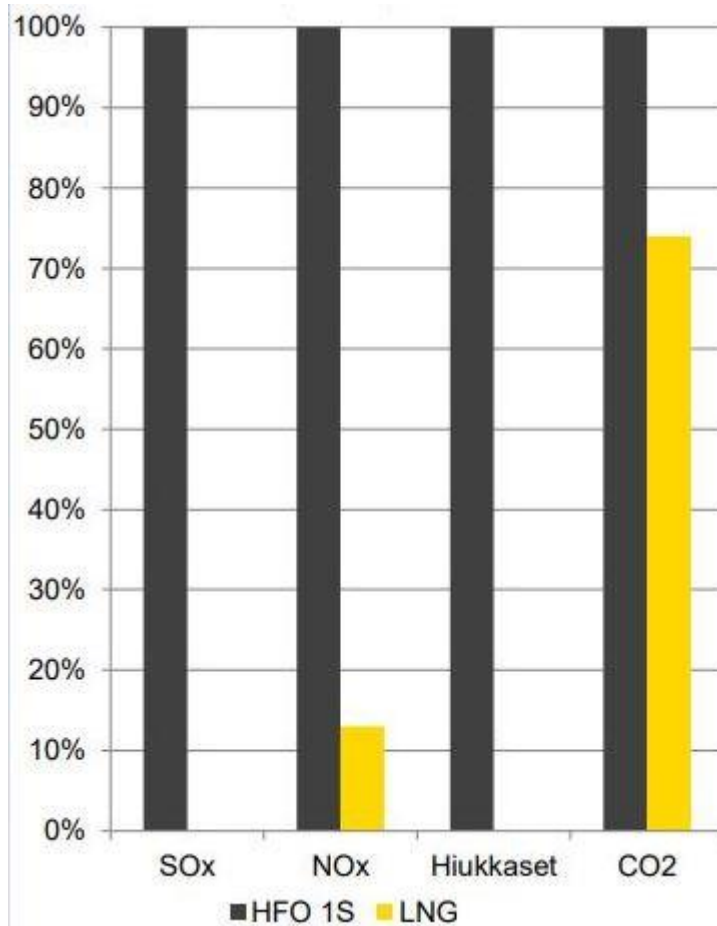
Maakaasu muuttuu nestemäiseen muotoon jäähtyessään alle kiehumispisteensä, joka on  $-162\text{ °C}$ . Nestemäisen maakaasun tilavuus on 1/600 kaasumaiseen olomuotoon verrattuna. Nesteytetyn maakaasun tiheys on noin  $0.42\text{ kg/m}^3$ , joka on lähes puolet suurempi kuin meridieselin. Tästä syystä polttoaineen varastoiminen aiheuttaa haasteita alusten rakenteita suunniteltaessa. (Nesteytetty maakaasu 2018.)

## 4 Maakaasun käyttö meriliikenteen polttoaineena

Nesteytetyn maakaasun käyttö laivaliikenteen polttoaineena on lisääntynyt runsaasti viimeisen 10 vuoden aikana. Lähes kaikki uudet raskaaseen meriliikenteeseen tuotettavat alukset käyttävät pääasiallisena polttoaineenaan nesteytettyä maakaasua. Suurin syy LNG:n yleistymiseen laivaliikenteessä ovat ennestään kiristyneet päästövaatimukset sekä laivojen energiatehokkuuden parantaminen. (Suomen Kaasuyhdistys 2010.)

Merikuljetuksiin vaikuttavat päästövaatimukset sisältävät sallitut arvot kasvihuonekaasuille sekä rikki-, typpi- ja partikkelipäästöille. Päästövaatimuksilla on yhä suurempi merkitys meriliikenteen moottorivalinnassa sekä alusten suunnittelussa. Nesteytetty maakaasu on tällä hetkellä meriteollisuuden kustannustehokkain polttoaine, jolla voidaan täyttää myös vuonna 2021 voimaan astuvat päästövähennysveloitteet, joihin raskaalla polttoöljyllä ei ole enää mahdollista päästä (kuva 3). (Nesteytetty maakaasu 2018.)





Kuva 3. Aluskohtaiset päästöt, raskaspolttoöljy ja nesteytetty maakaasu (Nesteytetty maakaasu 2018).

Ensimmäiset merikäyttöiset LNG-kaasumoottorit on otettu käyttöön öljynporauslautoille operoivilla offshore-tukialuksilla sekä LNG-bunkrausaluksilla. LNG-bunkrausalukset käyttävät polttoainetta kuljetettavasta lastista, joten niissä ei ole omia polttoainesäiliöitä. Maailmanlaajuisesti nesteytettyä maakaasua käyttäviä matkustaja- ja rahtialuksia uskotaan olevan noin sata, ja lukumäärä tulee kasvamaan huomattavasti seuraavien kymmenien vuosien aikana, sillä suuri osa uusista aluksista valmistetaan LNG-käyttöisiksi. Lisäksi vanhojen dieselkäyttöisten alusten muuttaminen kaasukäyttöisiksi todennäköisesti yleistyy nykypäivänä kehittyvän infrastruktuurin ansiosta. (BG Group 2018.)

Korvaaviksi polttoaineiksi ennustetaan maakaasun lisäksi metanolia sekä uusiutuvaa biokaasua. Etenkin metanoli soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin polttoaineeksi. Bioenergian osuutta meriteollisuudessa ennustetaan kuitenkin suhteellisen vähäiseksi. Sen käyttö polttoaineena on kuitenkin mahdollista jatkojalostuksen ja energiatehokkuu-

den paranemisen myötä. Uusiutuvan biokaasun haasteeksi muodostuu sen vaikea varastointi sekä kuljetus. Kaasumaisessa muodossa sen tilavuus on huomattavasti suurempi verrattuna nestemäiseen maakaasuun. Maakaasun logistiikka Euroopassa on riippuvainen kaasuverkostosta. Eurooppaan saapuvasta kaasusta noin 86 % tuodaan kaasuputkia pitkin ja 14 % nestemäisenä maakaasuna maa- ja merikuljetuksina. Kaasuputkien käyttö on kustannustehokkain kuljetustapa maakaasulle, mutta se rajoittaa kuljetusta alueellisesti sekä rajaa näin toimitusmahdollisuuksia. Nestemäisen maakaasun kuljetus on puolestaan riippuvainen LNG-terminaaleista. (Nesteytetty maakaasu 2018.)

Kaasun käyttö meriliikenteen energialähteenä toteutetaan pääasiassa dual fuel -menetelmällä. Tässä tapauksessa moottorin pääasiallisena polttoaineena toimii maakaasu, joka muutetaan nestemäisestä muodosta takaisin kaasuksi ennen moottoriin syöttämistä. Kaasutoimiset merimoottorit on varusteltu kuitenkin toimimaan myös tavanomaisella meridieselillä hätätilanteen tai polttoainesyötössä tapahtuvan häiriön varalta. Vaikka maakaasun kuljetusta ja varastointia pidetään turvallisena, sen käyttöä on säädelty monin tavoin mahdollisen räjähdys- ja paloriskin takia. (Yanmar 2015.)

Maakaasun sisältämän metaanin syttymislämpötila on erittäin korkea, minkä takia moottoreissa vaaditaan käytettäväksi erikoisvalmisteisia sytytystulppia tai pilottipolttoainetta sytytyksen mahdollistamiseksi. Sytytykseen tarvittava erillinen energialähde on välttämätön metaanin alhaisen setaaniluvun takia. Setaaniluvulla tarkoitetaan polttoaineen syttymisherkkyttä. Se kuvaa esimerkiksi dieselöljyn laatua samalla tavalla kuin oktaaniluku kuvaa bensiinin laatua. Setaaniluvulla ei voida kuvata kaikkien polttoaineiden syttymisherkkyttä, vaikka niitä käytettäisiinkin dieselmoottorin polttoaineena. (Energy Education 2018.)

Esimerkiksi alkoholien kohdalla syttymisherkkyttä kuvataan usein diesel-indeksillä tai setaani-indeksillä. Dieselpolttoaineen setaaniluku on noin 40–55, kun taas metaanin setaaniluku on -10, joten sen syttymisherkkyys erittäin huono verrattuna dieselöljyyn. Tästä syystä pelkkää metaania käyttävä dieselmoottori vaatii muutoksia sytytykseen tai käytettäväksi dieselöljyn kanssa rinnakkaisena polttoaineena. Maakaasun itsesyttymislämpötila on noin 620 °C. Vertailukohtana kevyen polttoöljyn syttymislämpötila on yli puolet pienempi, noin 260–370 °C. Maakaasua voidaan käyttää polttoaineena ainoastaan kaasumaisessa olomuodossa. Polttoainesäiliöissä säilytettävä nestemäinen maakaasu

muutetaan takaisin kaasumaiseen muotoon höyrytimen avulla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös polttoainesäiliöihin muodostuvaa boil-off kaasua. (Oulun ammattikorkeakoulu 2009.)

## 5 Volvo Penta -merimoottorit

Volvo Penta on alun perin vuonna 1907 perustettu ruotsalainen teknologiayritys, jonka toiminta sijoittuu yli 130 maahan. Yritys työllistää noin 1400 työntekijää ja sen pääkonttori sijaitsee Göteborgissa, Ruotsissa. Yritys suunnittelee, valmistaa ja kehittää erilaisia voimansiirto- ja ohjausratkaisuja meriliikenteeseen sekä teolliseen tuotantoon. Volvo Penta on ollut osa Volvo Groupia vuodesta 1935, ja sen osuus on noin 3 % yrityksen kokonaisympäryksestä.

Volvo Penta -tuotanto koostuu tasaisesti 50 %:sta marine-tuotteita ja 50 % teollisuustuotteita. Yrityksen marine-puoli on jaettu kahteen eri osastoon, jotka jakautuvat niin sanottuun huviveneiden voimansiirtoon sekä kaupalliseen puoleen. Yrityksen valikoimasta löytyy erityyppisiä perämoottoreiden sekä sisämoottoreiden ajonhallintajärjestelmiä, jotka on jaettu omaan osastoonsa Volvo Penta IPS:ään. Volvo Pentan IPS-moottorit lanseerattiin ensimmäisen kerran vuonna 2005. IPS-moottorit perustuvat pystyakselinsa ympäri pyöritettäviin potkureihin, joita ohjataan sähköisellä ohjaussauvalla. IPS-moottoreita käytetään pääasiallisesti yksityiskäyttöisissä huviveneissä, mutta myös jonkin verran keskisuurissa kaupallisissa aluksissa.

Yritys valmistaa myös teolliseen tuotantoon soveltuvia paloöljykäyttöisiä sekä kaasutoimisia polttomoottoreita. Volvo Pentan moottorimallisto vaihtelee 7.5–1500 kW ja 2.4–16.1 litratilavuuden välillä. Moottoreita on tarjolla niin bensiini-, diesel- kuin kaasukäyttöisinä riippuen käyttötarkoituksesta. (Volvo Penta 2018.)

### 5.1 D12 D-MH 550

Työn tutkimuskohteena toimii Volvo Pentan suunnittelema ja valmistama sisämoottori, malliltaan D12 D-MH 550 (kuva 4). Se on Volvon Penta -malliston keskisuuri merimoottori. Moottori on malliltaan keskimoottori, eli se on sijoitettu kokonaisuudessaan aluksen sisätiloihin ja välittää liikkeen potkurille erillisen potkuriakselin välityksellä. Moottori toimii laivan voimansiirron pääkoneena, jonka lisäksi aluksessa käytetään erillistä apukonetta

sähköntuotantoon. Moottorin käyttötarkoituksena on voimansiirto ainoastaan potkurille, joten sen käytöllä ei ole vaikutusta aluksen ohjattavuuden kanssa toisin kuin perinteisellä perämoottorilla tai ruoripotkurilla. Tutkittavassa aluksessa on käytössä myös toinen vastaavanlainen moottori, joka on sijoitettu aluksen keulapotkurin moottoriksi. Tällä ei ole kuitenkaan tutkimuksen kannalta merkitystä, joten se on jätetty pois tästä opinnäyttyöstä.

Moottorin jäähdytys on toteutettu suoravesijäähdytyksellä eli merivesikierrolla. Merivesijäähdytystä käytetään erityisesti turboahtimien jäähdytyksessä. Muiden komponenttien jäähdytykseen on käytetty perinteistä glykolikiertoa ja moottorin sisäistä vesipumppua.



**Kuva 4. Volvo Penta D12 D-MH 550 (Volvo Penta 2007).**

Kyseessä on kuusisylinterinen diesel-nelitahtimoottori, jossa sylinterit on sijoitettu pitkitäissuunnassa. Moottorin sylinterilohko sekä sylinterikansi ovat materiaailtaan valurautaa. Jokaista sylinteriä kohden toimii neljä venttiiliä, kaksi imuventtiiliä ja kaksi pakoventtiiliä. Sylinterinkansi on tyypiltään CCH-malli, jossa imu- ja pakoportit oli sijoitettu vastakkaisille puolille sylinteriin nähden. Männät ovat rauta-alumiiniseosta, ja siinä käytetään kolmea männänrengasta sekä öljyllä toimivaa jäähdytysporttia. (Plaquet 2008.)

Moottorissa toimii sähköisesti ohjeistettu monipisteruiskutus, jossa toimii yksi ruiskusuu- tin sylinteriä kohden. Suuttimet on sijoitettu vaakatasoon venttiileiden keskelle. Suuttimien ajoitusta pystytään säätämään elektronisesti EMS-järjestelmän avulla. Jokaisessa suuttimessa on viisi korkeapaineistettua aukkoa, joista polttoaine syötetään sylinteriin. Koko polttoainelinjastossa toimii vedenerottimella varustettu polttoainesuodatin. Malli-

merkintä D12 550 viittaa moottorin 12.13 l litratilavuuteen 17.5:1 puristussuhteella. Maksimitehona moottorilla on 405 kW eli noin 550 hp. Maksimiteho saavutetaan kierrosalueella 1 900 rpm. (Volvo Penta 2007.)

## 5.2 Järjestelmän muutostyö

Meridieseliä sekä nesteytettyä maakaasua voidaan käyttää erilaisissa palamisprosesseissa. Eri muutostöiden toteutuksissa saatiin selville niiden etuja sekä haasteita. Koska tämä työ on ainoastaan teoreettinen tutkimus, oli vaikea arvioida tarkalleen, kuinka kyseiset muutosratkaisut toimisivat käytännössä tutkittavassa moottorityypissä. Työssä ei otettu huomioon moottorin kohdistuvaa rasitusta eikä huomioitu lujuuslaskelmia, joten moottorin toiminta todellisuudessa voi vaihdella tämän työn tutkimustuloksiin nähden.

Aluksessa käytettävä sisämoottori on asennettava suljettuun tilaan, jotta tulipalon sekä myrkyllisten kaasujen leviäminen on minimoitu. Tässä otetaan huomioon myös moottorin tuottama kuumuus, melu ja värinä. Moottori tulee asentaa erilliselle moottoripedille, jos moottorin teho ylittää 15 kW. Moottorin kiinnitys tulee varmistaa pulttaamalla se kiinni moottoripetiin ja näin minimoida värinävaimennuksen sekä työntörasituksen vastaanottaminen.

## 5.3 Aluksen rakenteisiin vaadittavat muutokset

Moottorin käynnistä aiheutuva lämpö edistää mahdollisen polttoainevuodon seurauksena polttoaineen kaasuuntumista. Kaasuuntunut polttoaine on erittäin herkästi syttyvää esimerkiksi starttimoottorin aiheuttamasta kipinästä. Tästä syystä moottoritilassa tulee olla kaasut poistava imuri, joka on erikseen kipinäsuojattu. Imuria käytetään ennen moottorin käynnistämistä, näin minimoiden mahdollinen polttoainevuodon aiheuttama tulipalo starttimoottoria käytettäessä. Moottorissa käytettävien putkien tulee olla metallia ja letkujen öljyä kestävä kumia tai muovia.

Polttoaineputkissa, pakoputkissa sekä moottorin jäähdytysjärjestelmässä käytettävissä putkissa tulee käyttää aineen lämpötilaa sekä kemiallisia ominaisuuksia kestävä materiaalia. Moottoritilassa kaikkien letkujen tulee olla palon kestävä EN ISO 7840 -standardin mukaista materiaalia. Jos varastoitava polttoainemäärä on 0.2–5 tonnia (10 m<sup>3</sup>), tu-

lee varastoinnista ilmoittaa erikseen Tukesille, joka hyväksyttää käyttöönoton tarkastuslaitoksen tarkastuksen mukaisesti. Jos varastoitava määrä ylittää 5 tonnia, tulee varastoinnista lähettää lupahakemus Tukesille, joka pyytää lisäksi erilliset lausunnot pelastuslaitokselta sekä elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselta.

Polttoainejärjestelmä tulee suunnitella ja asentaa syöttö- ja tankkausputkien, varastoinnin sekä tuuletuksen kannalta niin, että tulipalon ja räjähdysvaaran riski on minimoitu mahdollisimman tehokkaasti laivan rakenteisiin nähden. Polttoainesäiliöt sekä putket ja letkut tulee suojata kaikilta mahdollisilta lämpölähteiltä sekä kiinnittää tukevasti aluksen rakenteisiin tärinän ja muun rasituksen minimoimiseksi. Polttoainesäiliöiden rakenne ja materiaali tulee määritellä tilavuuden ja polttoainetyypin mukaisesti (kuva 5). Käytettäessä yli 50 l polttoainesäiliöitä, tulee se varustella erillisellä loiskelevyillä sekä huoltoihin tarkoitetulla luukulla. (Suomen Purjehdus ja Veneily 2017.)

<b>Dieselpolttoaine</b>	
alumiini	2 mm
ruostumaton teräs	1 mm
korroosiosuojattu teräs	1,5 mm
polyeteeni	5 mm
lasikuitulaminaatti	4 mm (ei saa olla rungon rakenteellinen osa)

**Kuva 5. Sopivat säiliömateriaalit ja seinämävahvuudet dieselsäiliölle (Suomen Purjehdus ja Veneily 2017).**

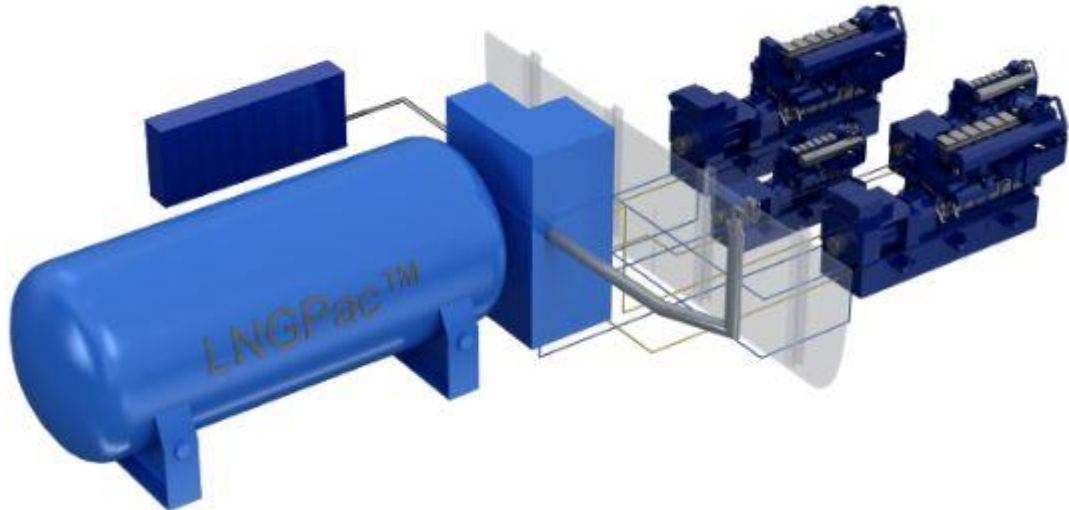
LNG on säilöttävä erittäin alhaisen lämpötilansa takia erityisissä kryogeenisissä säiliöissä. Polttoainesäiliöiden lämmöneristystä kuvataan Boil-Off Rate -luvulla, jolla ilmaistaan vuorokaudessa haihtuneen polttoaineen määrä prosentteina. LNG-alusten tyypillinen BOR on noin 0.15–0.25 % päivässä.

Höyrystynyt osa polttoaineesta tulee poistaa säiliöstä oikean paineen ja lämpötilan varmistamiseksi. Tehokkain tapa hyödyntää jo valmiiksi höyrystynyt polttoaine on käyttää se aluksen polttoaineena. Kaasuuntunut polttoaine on mahdollista myös uudelleen nesteyttää, mutta siihen käytettävä laitteisto on suhteessa erittäin kallis hyötysuhteeseensa nähden. (Transactions on Maritime Science 2013.)

Nykyiset LNG-polttoainetankit ovat yleensä teräsrakenteisia säiliöitä, joiden materiaalina käytetään pääasiassa nikkelseosteista terästä, ruostumatonta terästä tai alumiinia. Tankit ovat muodoltaan usein lieriömäisiä, ja niiden päädyt ovat pallokalotin muotoiset paineen aiheuttaman rasituksen minimoimiseksi. Säiliöt on usein eristetty polyuretaanisolumuovilla. Työssä tarkasteltavan noin 400 kW merimoottorin optimaalinen nestekaasu-säiliö on arviolta 30–35 m<sup>2</sup>. Koska säiliö on kapasiteetiltaan huomattavasti pienempi kuin LNG-bunkrausaluksissa, ei sen muodolla ole erityistä merkitystä. Tankit ovat jaettu A-, B- ja C-luokkaan. A- ja B-luokan tankkeja käytetään pääasiassa maakaasun kuljettamiseen lastina. Tällaisia tankkeja käytetään lähinnä bunkrausaluksissa, kun kuljetettava massa on erittäin suuri. (Marine Insight 2017.)

C-luokan tankit ovat yleisin ja tehokkain ratkaisu, kun polttoaine halutaan varastoida käytettäväksi heti kuljetuksen aikana. A- ja B-luokan tankit ovat usein tilavuudeltaan todella suuria ja muodoltaan pallomaisia, tasaisen rasituksen jakamiseksi. C-luokan tankit ovat puolestaan usein sylinterimäisiä, ja ne voidaan sijoittaa joko pysty- tai vaakatasoon. C-luokan tankeissa paine on tyypillisesti noin 5–7 bar. Tankit ovat usein kaksoissäiliöitä, joiden välissä käytetään lämpöeristettä tai inerttikaasua. Kohtalaisen pienen tilavuuden ja hyvän eristyksensä ansiosta C-luokan tankkeja ei tarvitse erikseen jäähdyttää maakaasun pitämiseksi nestemäisessä muodossa. (WPCI 2013.)

Wärtsilä tarjoaa LNGPac -järjestelmän (kuva 6) nesteytetyn maakaasun uudelleenkaasutukseen. Laitteiston tarkoituksena on muuttaa nestemäinen maakaasu takaisin kaasumaisen olomuotoon, jolloin sitä voidaan käyttää polttoaineena. LNGPac sisältää polttoainetankit, bunkrausaseman sekä siihen tarvittavat putkistot, liittimet, lämmityspiirin sekä ohjaus- ja valvontajärjestelmän. (Wärtsilä 2017.)



Kuva 6. Wärtsilä LNGPac (Wärtsilä Gas Solutions 2017).

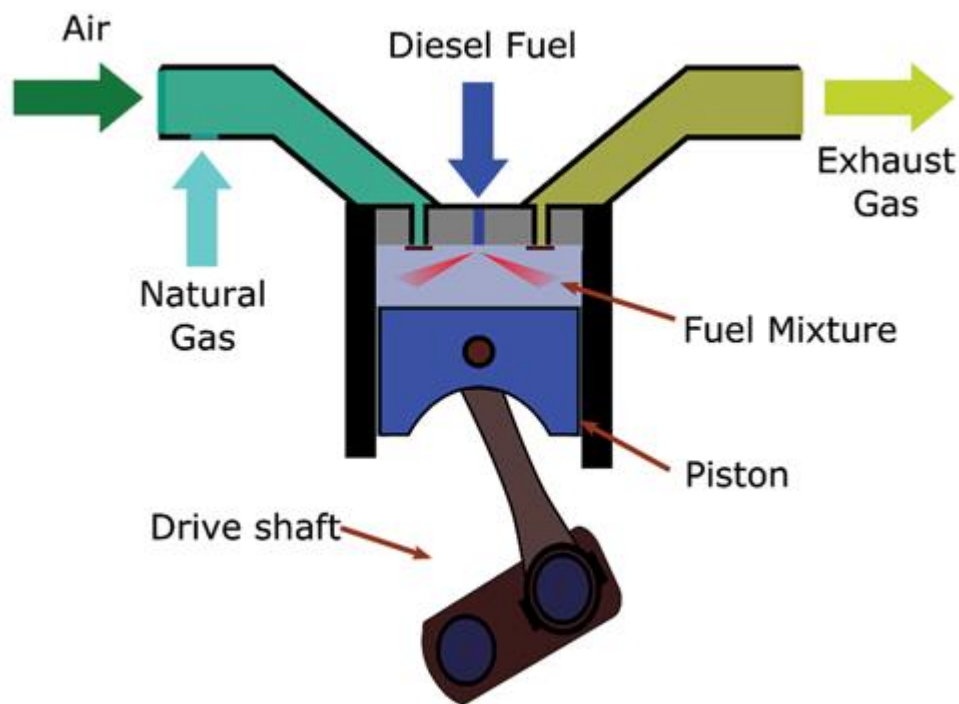
Järjestelmä soveltuu kaikkiin IMO:n hyväksymiin C-tyyppin paineistettuihin polttoainesäiliöihin, joissa käyttöpaine on noin 6–9 bar. LNGPac -järjestelmät suunnitellaan aluskohdaisesti polttoainetankkien koon sekä polttoainejärjestelmän sijoittelun mukaisesti. LNGPac -järjestelmä säättää reaaliaikaisesti kaasulle optimaalisimman lämpötilan sekä paineen, jolla polttoainetta voidaan käyttää mahdollisimman tehokkaasti. Järjestelmän ohjausyksikkö on täysin automaattinen, ja sen toiminta perustuu moottorista saataviin adaptaatioarvoihin. Wärtsilä lupaa järjestelmän hyödyntävän maksimaalisen volyymin LNG:n osalta sekä parempaa toimintavarmuutta koko polttoainejärjestelmälle. (Wärtsilä Gas Solutions 2017.)

#### 5.4 Dual fuel -moottori

Kaksoispolttomoottori eli dual fuel -moottorilla tarkoitetaan muokattua dieselmoottoria, joka käyttää pääasiallisena polttoaineena jotain muuta energialähdettä kuin dieselöljyä. Dual fuel -moottoreita on saatavilla laajasti nykyaikaisissa henkilö- ja raskaan kaluston ajoneuvoissa, mutta ne ovat yleistymässä myös marine-puolella etenkin rahtiliikenteen ja jäänmurtajien keskuudessa. Dieselmoottoreihin on saatavilla myös jälkikäteen asennettavia muutossarjoja, mikä käytännössä mahdollistaa dual fuel -ominaisuuden käytön missä tahansa nykyaikaisessa dieselmoottorissa, jonka toiminta perustuu sähköiseen polttoaineen ohjaukseen sekä monipisteruiskutukseen. (Wartsila.com 2014.)



Dieselöljyä käytetään dual fuel -moottorissa toissijaisena polttoaineena usein käynnistyksen avustamisessa sekä varapolttoaineena. Dual fuel -moottorilla (kuva 7) on yleisesti hyvä terminen hyötysuhde korkealla kierrosalueella käytettynä, mutta kohtalaisen huono hyötysuhde osakuormituksella käytettynä johtuen kaasun heikosta palamisnopeudesta. Tästä syystä dual fuel -moottorin käyttöä merimoottorina on kyseenalaistettu, koska käytettävä kierrosalue on usein huomattavasti matalampi kuin esimerkiksi maantieliikenteen raskaankaluston moottoreissa. Moottorin käyttöaluetta eri kierrosalueella on kuitenkin mahdollista parantaa suuttimien oikealla ajoituksella, polttoaineiden seoksen suhteella sekä polttoaineen syötöllä. Dual fuel -moottorissa maakaasu syötetään ennen dieselöljyä sylinteriin ja dieseliä käytetään sytytyksen energialähteenä. (Drilling Contractor 2016.)



Kuva 7. Dual fuel -moottori (Drilling Contractor 2016).

Korkean setaaniluvunsa ansiosta diesel syttyy moottorissa nopeasti sytyttäen samalla myös ilmaan ja dieseliin sekoittuneen maakaasun palotilassa. Vaikka maakaasun käyttäminen vaihtoehtoisena polttoaineena dieselin rinnalla alentaa tutkitusti erityisesti moottorin hiukkaspäästöjä sekä typen oksidipäästöjä, ei palotapahtuma ole koskaan täysin puhdas. Näin ollen karstan muodostuminen palotapahtuman seurauksena on väistämätöntä. Tästä syystä pienhiukkassuodattimen käyttäminen on lähes välttämätöntä, jotta

päästörajoitukset on mahdollista pitää sallituissa arvoissa. Moottorin käyttöasteen kannalta ei olisi merkittävää eroa, käytettäisiinkö maakaasua puristetussa vai nestemäisessä muodossa polttoaineena. Nestemäisen maakaasun hyödyt perustuvat ainoastaan sen helppoon kuljetukseen sekä varastointiin verrattuna kaasumaiseen olomuotoon. (Bell Performance 2014.)

Dieselmoottorin muuttaminen kaasukäyttöiseksi kaksoispolttoainemoottoriksi voidaan yleisesti toteuttaa kahdella eri tavalla. DING eli *direct injection natural gas* ja DFNG eli *dual fuel natural gas* -moottorit käyttävät late-cycle -toimisia suoraruiskutus-suuttimia. Suoraruiskutuksella tarkoitetaan yleisesti polttomoottorin polttoaineen syöttöjärjestelmää. Suoraruiskutuksessa sylinterin palotilaan syötettävä polttoaine annostellaan sähköhajuilla ruiskusuuttimilla. Polttoaineen syöttö suuttimille tapahtuu erillisellä jakajapumpulla, jossa polttoaineputkisto on sylinterikohtainen. Polttoaineen syöttö voidaan toteuttaa myös sylinterikohtaisilla pumppusuuttimilla tai yhteispaineruiskutuksella eli common rail -järjestelmällä.

Dual fuel -moottorin etuna on korkea hyötysuhde kohtalaisen laajalla kierrosalueella. Sen käyttö etenkin suuremmissa avomerialuksissa on tehokasta, koska päästörajoitukset vaihtelevat hyvinkin rajusti eri merialueilla. Tästä syystä moottorin polttoaineseosta voidaan muokata suoraan ajon aikana riippuen päästörajoituksista sekä optimaalisesta polttoainekustannuksesta. (Zhao 2010.)

## 5.5 Vaihtoehtoinen moottori

Muokattaessa kokonaan uutta moottoria kaasukäyttöiseksi, muutostyön kohteeksi soveltuvat erityisen hyvin apumoottorilliset D13- ja D16 -tyypin sisämoottorit. Nämä moottorit vastaavat rakenteeltaan sekä ominaisuuksiltaan hyvin pitkälti Volvo Penta -mallistosta löytyvää TWG1663GE -mallin kaasukäyttöistä teollisuusmoottoria.

Volvo Penta -valikoimassa on maakaasua käyttävä moottorityyppi, joka on suunniteltu teolliseen käyttöön. Moottori on malliltaan TWG1663GE (kuva 8) ja lähes vastaava kuin Volvon D16 MH -tyypin dieselmoottori. Korvaava moottori on litratilavuudeltaan jonkin verran suurempi tutkimuskohteena käytettyyn D12 -malliin verrattuna.

Tulevaisuudessa Volvo tulee todennäköisesti kehittämään myös pienempiä LNG-toimisia moottoreita, jotka soveltuisivat tutkimuskohteena toimineen moottorin korvaajiksi vielä entistäkin paremmin.



**Kuva 8. Volvo TWG1663GE -moottori (For Construction Pros 2011).**

Moottori on 16-litrainen rivimoottori, joka tuottaa 595 kW maksimiteholla. Se on varustettu turboahtimella sekä elektronisesti ohjatuilla venttiileillä. Moottorin sytytyksessä käytetään pilottipolttoaineena dieseliä, jonka avulla myös maakaasu saadaan syttymään moottorin sylintereissä. Volvon mukaan moottorilla voidaan alittaa nykyiset TIER 4 -päästövaatimukset, jotka pitävät sisällään myös EPA- ja CARB -päästövaatimukset. TWG1663GE käyttää myös SCR-tekniikkaa minimoidakseen palamisesta aiheutuvia typpi- ja hiukkaspäästöjä. (For Construction Pros 2011.)

Maakaasumoottorin toiminta perustuu kaksoispolttoainejärjestelmään, jossa maakaasun ja dieselin suhde on noin 70–30 % normaalilla kierrosalueella. Korkeammilla kierrosalueilla dieselin käytettävyys kasvaa energiatehokkuutensa vuoksi. Moottoria voidaan tarvittaessa käyttää myös ainoastaan dieselillä, joten se soveltuu hyvin merimoottoriksi

mahdollisen kaasuvuodon tai vaurion takia. Kaasumoottorin sytytyksessä ei ole välttämätöntä käyttää esipolttoainetta, vaan se voidaan toteuttaa myös kipinänsytytyksellä, joka on yleinen sytytysratkaisu bensiinikäyttöisissä moottoreissa. Täysin kaasulla toimivan moottorin etuna on, että polttoaineiden varastoiminen sekä hallinnoiminen helpottuvat. Toisaalta tästä syystä myös moottorin käyttövarmuus heikkenee, kun käytössä ei ole varapolttoainetta mahdollisen polttoainevuodon tapahtuessa. Myös tämänhetkinen kaasun jakelu sekä bunkraus vaatii entistä tarkempaa suunnittelua polttoaineen kulutukselle sekä liikennöimiselle. (Man Diesel and Turbo 2018.)

## 6 Muutostyön haasteet

Vaikka nesteytetyn maakaasun käytössä nähdään suurta potentiaalia ja sen uskotaan olevan seuraava suuri edistysaskel meriliikenteen polttoaineena, sisältää se myös suuria haasteita etenkin varastoimisen osalta. Dieselmoottorin muutostyö LNG-käyttöiseksi moottoriksi on mahdollista toteuttaa kohtalaisen vaivattomasti moottorin komponenttien osalta. Suurin haaste muutostyölle on nesteytetyn maakaasun varastoiminen sen tilavuuden sekä käyttöiän vuoksi.

Nesteytetty maakaasu säilyy kylmäsäilytelyyn soveltuvissa polttoainetankeissa nestemäisessä muodossa vain noin 30 vrk. Tämä jälkeen maakaasu alkaa vähitellen höyrystyä ja se joudutaan laskemaan käyttämättömänä ilmakehään. Nesteytetty maakaasu soveltuukin ainoastaan aluksiin, jotka operoivat jatkuvan ja säännöllisen aikataulun mukaisesti. Tällä voidaan varmistaa, että polttoaineen kulutus sekä sen bunkraus on säännöllistä, eikä näin polttoaineen höyrystymiselle ole riskiä.

### 6.1 Polttoainevuoto

Nesteytetyn maakaasun vuototilanteessa aine alkaa kiehua ympäristön ylittäessä kriittisen lämpötilan. Tämän seurauksena polttoaine höyrystyy polttoainetankeissa. Höyrystymisen voimakkuus riippuu ympäröivän ilman paineesta sekä lämpötilasta. Höyrystymisen alkuvaiheessa kaasun lämpötila on lähes sama kuin nestemäisessä muodossa. Tästä syystä se on ilmaa tiheämpää ja vuototilanteessa se kasautuu kerroksiksi lattiatasolle.

Kaasun lämmentyä noin 80-asteiseksi sen tilavuus on ilmaa pienempi, minkä vuoksi se alkaa haihtua ilmakehään. Vuotanut kaasu sekoittuu ilmassa olevaan vesihöyryyn muodostaen sumulta vaikuttavia ”pilviä”, joista on mahdollista jäljittää järjestelmän vuoto-kohta. Vuodon tapahtuessa putkistossa korkean käyttöpaineen seurauksena kaasu virtaa ja sekoittuu nopeasti ympäröivän ilman kanssa. Polttoaineena käytettävä maakaasu hajustetaan voimakkaanhajuisella tetrahydrotiofeenilla helpottamaan polttoainevuodon havaitsemista. Tetrahydrotiofeenia käytetään hyvin pieniä määriä polttoaineen seassa sen myrkyllisyyden sekä matalan syttymispisteen takia. (SFS 2013.)

## 6.2 Rollover-reaktio

Polttoainetankeissa on mahdollista pitää myös kahta erilaatuista nesteytettyä maakaasua. Näiden kahden aineen sekoittumista kutsutaan rollover-reaktioksi. Kaasujen laatu-eron takia niillä on myös eri tiheys polttoainetankissa. Aineiden eri tiheys johtaa polttoaineiden kerrostumiseen päällekkäin. Tällaisen polttoainelastin äkillinen lämpeneminen johtaa aineiden tiheyksien tasaantumiseen, minkä seurauksena aine alkaa höyrystyä erittäin nopeasti ja hallitsemattomasti. Toisin kuin hitaasti tapahtuvaa boil-off -höyrystymistä, lastin sekoittumista on vaikea ennakoida ja havaita. Boil-off -reaktiota voidaan puolestaan hallita paineensäädöllä sekä päästämällä kaasuuntunutta ainetta ulos polttoainetankista.

Aineiden sekoittuminen voidaan ennaltaehkäistä bunkrauksessa vaadittavan kirjanpidon seuraamisella. Kirjanpidosta tulee käydä ilmi, minkälatausta ainetta polttoainetankeissa on ennestään ja minkälatausta ainetta niihin on tulossa. Jos aineiden koostumukset eroavat huomattavasti toisistaan, tulee ne bunkrata eri polttoainetankkeihin. Boil-off kaasun muodostumisesta voidaan myös päätellä mahdollisen aineiden sekoittumisen riski. Jos boil-off -kaasua muodostuu huomattavasti tavallista vähemmän, on todennäköistä, että aineet ovat sekoittumassa keskenään. (Summary Report by the GIIGNL Technical Study Group on the Behaviour of LNG in Storage 2015.)

## 6.3 BLEVE-räjähdyks

BLEVE-räjähdyks on tyypillinen räjähdystyyppi paineistetulle ja nesteytetylle kaasulle. Räjähdyks on mahdollinen, kun polttoainetta säilytetään suljetussa säiliössä normaali-ilmapainetta korkeammassa paineessa. Nesteytetyn maakaasun tapauksessa paineistetun

polttoainetankin vaarana on äkillinen paineen aleneminen, jonka seurauksena nesteytetty maakaasu alkaa höyrystyä ja lopulta kiehua.

Tämän seurauksena paine polttoainetankissa kasvaa erittäin nopeasti. Aineen paineen äkillinen laskeminen johtuu yleensä polttoainevuodosta. Tästä johtuen polttoaine laajenee äkillisesti paineistetussa tankissa ja johtaa polttoainetankin repeämiseen tai räjähtämiseen. (Marine Insight 2017.)

#### 6.4 IGF-koodi ja koulutus

IGF-koodi eli *The International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels* (IGF Code) on Euroopan unionin ja kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n vuonna 2017 voimaan astunut sopimus, jolla säädellään tietyt alustyyppöjä. Sopimuksen tarkoituksena on asettaa tietyt vaatimukset aluksille, jotka käyttävät polttoaineena kaasua tai muuta alhaisen leimahduspisteen polttoainetta.

IGF-koodi asettaa vaatimuksia alusten rakenteille, koneistoille sekä miehistön koulutukselle ja turvallisuudelle. Tarkoituksena on määrittellä yhteiset standardit aluksille, jotka eivät kuljeta nestemäisiä kaasuja irtolastina. Tällaisten kuljetusalusten tulee noudattaa IGC-koodin mukaisia rakenne- ja varustelusäännöksiä. (IMO 2015.)

STCW-yleissopimuksen pohjalta 5.10.2017 voimaan astuneen säädöksen takia IGF-luokitelluilla aluksilla työskentelevältä henkilökunnalta on edellytetty lisäpätevyysvaatimusta. Alusten päälliköiltä, päällystöltä ja polttoaineeseen liittyvissä toimittehtävissä työskenteleviltä avainhenkilöiltä on vaadittu alusturvallisuutta lisäävä pätevyys. IGF-lisäpätevyksiä on kahta eri tasoa. Perustason lisäpätevyys vaaditaan laivahenkilökunnalta, joka työskentelee polttoaineen käyttämiseen sekä huolehtimiseen liittyvissä turvallisuustehtävissä. Lisäkoulutus on tarkoitettu alusten päälliköille, konepäällystölle sekä polttoaineineen bunkrauksesta ja polttoainejärjestelmästä vastuussa olevalla henkilöstölle.

Lisäpätevydessä vaaditaan peruskoulutuksen ja lisäkoulutuksen lisäksi vähintään kuukauden meripalvelujakso IGF-aluksella. Meripalveluun tulee sisältyä osallistuminen vähintään kolmeen polttoainetäydennykseen, joista kaksi on simuloituja lisäkoulutusharjoituksia. IGF-aluksia koskevat lisäpätevydet ovat voimassa viisi vuotta. (TraFi 2017.)

## 7 Kaasu tulevaisuudessa

Maakaasun osuus Suomen energialähteistä on tällä hetkellä noin 11 %. Suomeen saapuva maakaasu on peräisin Venäjältä ja se käytetään pääasiassa Etelä-Suomessa. Suomeen saapuva niin sanottu putkikaasu on hinnoittelultaan erittäin kilpailukykyistä Euroopan alueella. Kaasun saatavuus Itämeren alueella on rajoitettua riittävän infrastruktuurin puuttuessa.

Itämeren ensimmäinen LNG-terminaali avattiin Nynäshamnissa vuonna 2011. Seuraavat terminaalit avattiin Klaipedassa ja Lysekilissä vuonna 2014. Eurooppaan suunniteltavien LNG-terminaalien yhteiskapasiteetin uskotaan olevan yli 15 miljoonaa tonnia vuodessa. EU:n puhtaat polttoaineet -hankkeen tavoitteena on puolestaan saada yhteensä 139 LNG-terminaalia eri puolille Eurooppaa sekä LNG-tankkausasemia raskaalle liikenteelle 400 km välein vuoteen 2025 mennessä. (Exxon Mobil 2018.)

Venäjälle Laukaansuuhun on suunnitteilla maakaasun nesteytyslaitos, jonka kokonaiskapasiteetin uskotaan ylittävän 10 miljoonaa tonnia vuodessa. Venäjä on tiedottanut suunnitelmistaan kasvattaa LNG:n tuotantoaan tulevina vuosina noin 50–60 miljoonan tonnin vuosituotantoon vuoteen 2025 mennessä. Tavoitteisiin päästäkseen Venäjän suunnitelmissa on kehittää kuusi maakaasun jalostus- ja nesteytyslaitosta Kaukoidän ja Itämeren alueille.

Kaasun uskotaan kattavan 24 % maailmanlaajuisesta laivaliikenteestä vuoteen 2025 mennessä. LNG:n uskotaan yleistyvän erityisen nopeasti päästövalvonta-alueiden laivaliikenteen polttoaineena. Itämeri on yksi rikkipäästöjen valvonta-alueista, joten LNG:n uskotaan olevan paras vaihtoehto määräysten täyttämiseksi. Norjalaisen DNV GL -yhtiön ennusteen mukaan tulevaisuudessa operoi noin 400–600 LNG bunkrausalusta maailmanlaajuisesti vuoteen 2020 mennessä. (DNV GL 2018.)

Logistiikassa nähtävän potentiaalin lisäksi uskotaan LNG:lle muodostuvan kilpailukykyinen perushinta volyymin ja infrastruktuurin lisääntyessä tulevaisuudessa. Uusien kuljetustekniikoiden kehittyessä ja LNG-terminaalien lisääntyessä maakaasun tuonti voidaan mahdollistaa myös länsimaista. Tällä tavoin voitaisiin vähentää huomattavasti Suomen riippuvuutta Venäjän maakaasuvarannoista ja kilpailuttaa tarjontaa sekä hinnoittelua entisestään. Kaasusta maksava kuluttaja mieltää kuitenkin kilpailukykyisen maakaasun hinnoittelun usein liian korkeaksi tänä päivänä.

Pohjois-Suomeen suunnitellut maakaasuputki- ja jalostushankkeet ovat epäonnistuneet logistiikkaan liittyvien haasteiden tai taloudellisten ongelmien takia. Tulevaisuudessa tavoitteena on hyödyntää Norjassa tuotettua kaasun myös Pohjois-Suomessa. Helppo kuljettaminen maateitse sekä vaivaton varastoiminen mahdollistaisi LNG-terminaalien lisääntymisen ja käytön myös Perämeren ja länsirannikon kaupungeissa. Maakaasun käyttö kannattavana energialähteenä teollisuudessa edellyttää LNG-terminaalien käyttökohteen läheisyyden, jotta nestemäinen maakaasu voitaisiin purkaa tehokkaasti takaisin kaasumaiseen muotoonsa. Jotta maakaasua voidaan kuljettaa kaasumaisessa muodossa, vaatii se myös laajamittaisen kaasuputkiston käyttökohteiden sekä terminaalien välille. (Politiikasta 2015.)

Suomalainen LNGTainer aloitti uudenlaisten LNG-säiliöiden valmistuksen vuoden 2017 syyskuussa. Uudenlaisten kaasusäiliöiden ansiosta maakaasun varastointi ja kuljetus on huomattavasti energiatehokkaampaa. Säiliöiden kapasiteetti on 15 % suurempi ja 30 % kevyempi perinteisiin maakaasusäiliöihin nähden. LNGTainerin mukaan uusien säiliöiden energiatehokkuus perustuu uudenlaiseen eristystekniikkaan, joka on sijoitettu säiliön sisäpinnalle. Suurimpana haasteena on pidetty LNG:n ominaisuutta höyrystyä nesteytetystä muodosta pitkään jatkuneen varastoinnin seurauksena. Uusien LNG-säiliöiden avulla maakaasua voidaan tulevaisuudessa säilyttää nesteytetystä muodossa jopa kaksi kuukautta, mikä mahdollistaa sen kuljetuksen uusille markkina-alueille. (Nordic Business Insider 2017.)

Vaikka maakaasun käytössä nähdään suurta potentiaalia sen energiatehokkuuden sekä kustannusten kannalta, epävarmuus sen hinnoittelun kehittymisestä ei kannusta kuluttajia investoimaan maakaasun käyttöön Suomessa vielä tällä hetkellä. Suuret investointikustannukset sekä tulevaisuudessa kiristynyt verotus rajoittavat vielä maakaasun yleistymistä Suomessa. Jotta maakaasua voidaan käyttää kustannustehokkaasti meriliikenteen polttoaineena, tulee sen jakelujärjestelmän kehittyä entisestään pienten ja keski suurten yritysten kannalta kannattavaksi. Maakaasun verotuksen keventäminen olisi merkittävä askel sen lisääntymiseen myös kevyen meriliikenteen polttoaineena ja kannustaisi uusiin investointeihin ja nykyisen jakeluverkoston kehittämiseen.



## 8 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä maakaasun soveltavuuteen meriliikenteen polttoaineena. Työ pohjautui pitkälti aikaisempaan työkokemukseen, jonka ansiosta Volvo Penta -merimoottorit olivat kohtalaisen tuttuja rakenteeltaan sekä käytännöltään. Työssä tutkittiin Volvo Penta -merimoottorin soveltuvuutta käyttää vaihtoehtoista polttoainetta meridieselin rinnalla, sekä meriliikenteen lainsäädännön asettamia vaatimuksia muutostyön suorittamiselle. Insinööriyössä tutkittiin myös nesteytetyn maakaasun turvallisuutta polttoaineena sekä mahdollisia onnettomuustilanteita. Opinnäytetyöhön kerätyn aineiston ja kirjallisuuden pohjalta voidaan todeta, että nesteytetty maakaasu soveltuu erinomaisesti meriliikenteen polttoaineeksi energiatehokkuutensa sekä vähäpäästöisyytensä ansiosta.

Maakaasun kemiallisen koostumuksen ja ominaisuuksien ansiosta sen käyttö tuottaa vähemmän kasvihuone- ja hiukkaspäästöjä kuin nykyinen meridiesel ja polttoöljy. Maakaasua käytettäessä dual fuel -moottorissa nestemäinen diesel oli kuitenkin edelleen välttämätön pilottipolttoaineen käytön takia. Sen aiheuttamat päästöt jäävät kuitenkin huomattavasti vähäisemmäksi kuin perinteisen dieselmoottorin. Meriteollisuuden yritykset tulevat todennäköisesti panostamaan LNG-käyttöisten moottoreiden kehitykseen ja suunnitteluun jatkossa entistä enemmän juuri vähäpäästöisyyden vuoksi.

Maakaasun tuotanto ja jatkojalostus ovat suhteellisen yksinkertaisia prosesseja, joista on laajaa ja pitkäaikaista osaamista niin Euroopassa kuin Amerikassa. Maakaasun kasvava potentiaali polttoaineena perustuukin hyvin vahvasti sen tehokkaaseen tuotantoon sekä kehittämiseen. Nesteytetty maakaasu ei ole sidoksissa öljyyn, vaikka se usein esiintyykin samoilla maa-alueilla. Tämän ansiosta maakaasun nykyinen hinnoittelu on varsin kilpailukykyinen ja se voidaan ennustaa huomattavasti pidemmälle aikavälille kuin öljyn hintakehitys. Meriliikenteen kaluston kehitystä voidaan pitää huomattavasti nopeampana kuin esimerkiksi maantieliikenteen raskaan kaluston. Tämän ansiosta uusien polttoainejärjestelmien suunnittelu ja kehitys ovat entistä ajankohtaisempaa myös pienille ja keskisuurille aluksille. Maakaasun suppea infrastruktuuri sekä logistiikan ja bunkrauksen asettamat haasteet kuitenkin rajaavat sen käyttöä merkittävästi vielä nykyään.

Myös kaluston uusimisen sekä mahdollisten muutostöiden kustannukset nousevat helposti korkeiksi. Tutkimuskohteena toimineen Volvo Penta -merimoottorin muutostyö maakaasukäyttöiseksi vaatisi vähintään käyttöönoton dual fuel -toimiseksi moottoriksi,

jossa polttoaineena käytettäisiin sekä nykyistä meridieseliä että maakaasua. Tämän lisäksi aluksen rakenteisiin tulisi tehdä muutoksia uusia polttoainesäiliöitä varten, sekä asentaa maakaasun syöttöön ja höyrystykseen vaadittavat laitteistot.

Tästä syystä on mietittävä tarkoin aluksen bruttovetoisuus, käyttötarkoitus sekä bunkrausvälit, jotta muutostöiden tekeminen on kannattavaa. Nesteytetyn maakaasun käyttö polttoaineena voi olla oikeassa tilanteessa taloudellisesti sekä ekologisesti erittäin kannattavaa. Se soveltuu ominaisuuksiltaan polttoaineeksi erittäin hyvin, mutta sen käyttöä nykyisissä Volvo Penta -merimoottoreissa ei voida pitää erityisen kannattavana laajojen sekä kalliiden muutostöiden takia. Vaaditaan myös kehitystä logistiikan sekä infrastruktuurin osilta, jotta sen käyttö olisi kustannustehokasta myös pienemmillä aluksilla.

## Lähteet

Atmosmare.fi. 2015. Maakaasu on ilmaston kannalta huono vaihtoehto. Verkkoaineisto. [http://www.atmosmare.fi/atmosmare/ajankohtaista/maakaasu\\_on\\_ilmaston\\_kannalta\\_huono\\_vaihtoehto.432.news](http://www.atmosmare.fi/atmosmare/ajankohtaista/maakaasu_on_ilmaston_kannalta_huono_vaihtoehto.432.news). Luettu 2.5.2018.

Bell Performance. 2014. What Cetane Value Does in Diesel Engines. Verkkoaineisto. <https://www.bellperformance.com/blog/bid/102350/What-Cetane-Value-Does-in-Diesel-Engines>. Luettu 29.7.2018.

BG Group. 2018. Connecting Singapore to the global LNG market. Verkkoaineisto. [https://www.britcham.org.sg/files/event\\_document/6/6LNG%20A5%20Booklet-FINAL.compressed.pdf](https://www.britcham.org.sg/files/event_document/6/6LNG%20A5%20Booklet-FINAL.compressed.pdf). Luettu 3.6.2018.

Biokaasuauto.fi. 2018. Biokaasun valmistus. Verkkoaineisto. <http://www.biokaasuauto.fi/biokaasun-valmistus>. Luettu 2.5.2018.

Bioste.fi. 2018. Biokaasu. Verkkoaineisto. <http://bioste.fi/bioenergia/biokaasu/>. Luettu 12.4.2018.

Conserve Energy Future. 2018. Advantages and Disadvantages of Natural Gas Energy. Verkkoaineisto. <https://www.conserve-energy-future.com/advantages-and-disadvantages-of-natural-gas.php>. Luettu 10.5.2018.

DNV GL. 2018. LNG as ship fuel. Verkkoaineisto. <https://www.dnvgl.com/maritime/lng/index.html>. Luettu 15.8.2018.

Drilling Contractor. 2016. Study looks at emissions, economic characteristics of dual-fuel, high-horsepower engine used in hydraulic fracturing application. Verkkoaineisto. <http://www.drillingcontractor.org/study-looks-emissions-economic-characteristics-dual-fuel-high-horsepower-engine-used-hydraulic-fracturing-application-39231>. Luettu 1.6.2018.

Exxon Mobil. 2018. LNG fueling the future. Verkkoaineisto. <https://corporate.exxonmobil.com/en/technology/liquefied-natural-gas/technology/lng-fueling-the-future>. Luettu 12.8.2018.

For Construction Pros. 2011. Volvo Penta Introduces Bi-Fuel Engine. Verkkoaineisto. <https://www.forconstructionpros.com/equipment/fleet-maintenance/other-components/press-release/10457143/volvo-penta-volvo-penta-introduces-bifuel-engine>. Luettu 7.6.2018.

Gasum. 2018. Biokaasu – Uusiutuvaa kotimaista energiaa. Verkkoaineisto. <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/>. Luettu 2.5.2018.

Gasum. 2018. Uusiutuvaa kotimaista energiaa. Verkkoaineisto. <https://www.gasum.com/kaasusta/biokaasu/biokaasu/>. Luettu 12.4.2018.

Green Reality. 2018. Aja päästöttömästi. Verkkoaineisto. <http://www.greenreality.fi/aja-paastottomasti>. Luettu 17.4.2018.

Hiilidioksidi. 2018. Verkkoaineisto. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Hiilidioksidi>. Luettu 12.4.2018.

Ilmasto.org. 2005. Hiilidioksidi. Verkkoaineisto. <http://ilmasto.org/ilmastonmuutos/kasvihuoneilmio-ja-ilmastonmuutos/kasvihuonekaasut/hiilidioksidi>. Luettu 30.4.2018.

IMO. 2015. Adoption of the International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels (IGF Code). Verkkoaineisto. [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.391\(95\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.391(95).pdf). Luettu 13.7.2018.

Man Diesel and Turbo. 2018. MAN B&W Dual Fuel Engines – Starting a New Era in Shipping. Verkkoaineisto. <https://www.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/man-b-w-dual-fuel-engines---starting-a-new-era-in-shipping.pdf?sfvrsn=4>. Luettu 6.6.2018.

Marine Insight. 2017. Understanding The Design of Liquefied Gas Carriers. Verkkoaineisto. <https://marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>. Luettu 10.7.2018.

Marine Insight. 2017. What is Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE) on Gas Carrier Ships? Verkkoaineisto. <https://marineinsight.com/tech/what-is-boiling-liquid-expanding-vapour-explosion-bleve-on-gas-carrier-ships/>. Luettu 5.7.2018.

Metaani. 2018. Verkkoaineisto. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Metaani>. Luettu 23.4.2018.

Nordic Business Insider. 2017. A Finnish startup has built 'the world's largest' LNG tank. Verkkoaineisto. <https://nordic.businessinsider.com/this-finnish-startup-has-closed-a-28-million-deal-to-help-revolutionise-how-energy-is-transported-around-the-world-2017-10/>. Luettu 17.8.2018.

Oulun ammattikorkeakoulu. 2009. Polttoaineiden ominaisuusvertailu. Verkkoaineisto. <https://www.oamk.fi/hankkeet/bioenergia/biog/docs/polttoainevertailu.pdf>. Luettu 15.5.2018.

Oy AGA Ab. 2018. Nesteytetty Maakaasu. Verkkoaineisto. <http://www.aga.fi/fi/legacy/attachment?files=tcm:1634-169000,tcm:634-169000,tcm:34-169000>. Luettu 12.6.2018.

Plaquet. 2008. Technical Data D12D-E MH 550. Verkkoaineisto. [http://www.plaquet.be/images/stories/PDF/VolvoPenta/D12/General/t\\_d12d\\_e\\_550.pdf](http://www.plaquet.be/images/stories/PDF/VolvoPenta/D12/General/t_d12d_e_550.pdf). Luettu 30.5.2018.

Politiikasta. 2015. Nesteytetty maakaasu Itämeren merenkulun polttoaineena. Verkkoaineisto. <https://politiikasta.fi/nesteytetty-maakaasu-itameren-merenkulun-polttoaineena/>. Luettu 15.8.2018.

SFS. 2013. SFS-käsikirja 58-2 Palavat kaasut: Säädökset ja standardit osa2: Nesteytetty maakaasu (LNG). 1. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Soetaert, Wim & Vandamme, Erick J. 2009. Biofuels. Iso-Britannia: Wiley.

Summary Report by the GIIGNL Technical Study Group on the Behaviour of LNG in Storage. 2015. Rollover in LNG Storage Tanks. Verkkoaineisto. [https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC\\_AREA/Publications/rollover\\_in\\_lng\\_storage\\_tanks\\_public\\_document\\_low-res.pdf](https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/Publications/rollover_in_lng_storage_tanks_public_document_low-res.pdf). Luettu 5.6.2018.

Suomen Kaasuyhdistys. 2010. Maakaasu käsikirja. Verkkoaineisto. [http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja\\_20110307.pdf](http://www.kaasuyhdistys.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja_20110307.pdf). Luettu 4.7.2018.

Suomen Purjehdus ja Veneily. 2017. Katsastussäännöt. Verkkoaineisto. <http://spv.fi/wp-content/uploads/2016/12/Katsastuss%C3%A4%C3%A4nn%C3%B6t-2017-1.pdf>. Luettu 1.8.2018.

The Composition of Biogas. 2015. Biogas Composition. Verkkoaineisto. <https://anaerobic-digestion.com/biogas-and-anaerobic-digestion/biogas-composition/>. Luettu 19.4.2018.

TraFi. 2017. Lisäpätevyudet voimaan IGF-aluksilla työskenteleville. Verkkoaineisto. [https://www.trafi.fi/trafi/ajankohtaista/5568/lisapatevyudet\\_voimaan\\_igf-aluksilla\\_tyoskenteleville\\_5\\_10\\_2017](https://www.trafi.fi/trafi/ajankohtaista/5568/lisapatevyudet_voimaan_igf-aluksilla_tyoskenteleville_5_10_2017). Luettu 28.7.2018.

Transactions on Maritime Science. 2013. Problem of Boil - off in LNG Supply Chain. Verkkoaineisto. <https://www.toms.com.hr/index.php/toms/article/view/55/47>. Luettu 10.7.2018.

Union of Concerned Scientists. 2018. The Future of Natural Gas. Verkkoaineisto. <https://www.ucsusa.org/clean-energy/coal-and-other-fossil-fuels/the-future-of-natural-gas#.W2l4KSgzaHs>. Luettu 2.5.2018.

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminta. 2018. Selvitys metaanilla toimivien kaasujoneuvojen käyttörajoituksista maanalaisissa tiloissa. Verkkoaineisto. <https://tietokayttoon.fi/documents/10616/6354562/10-2018-Selvitys+metaanilla+toimivien+kaasujoneuvojen+k%C3%A4ytt%C3%B6rajoituksista+maanalaisissa+tiloissa.pdf> / Luettu 23.6.2018.

Wartsila.com. 2014. Taking dual-fuel marine engines to the next level. Verkkoaineisto. <https://www.wartsila.com/twentyfour7/energy/taking-dual-fuel-marine-engines-to-the-next-level>. Luettu 1.6.2018.

Volvo Penta. 2007. Volvo Penta Inboard Diesel D12 MH. Verkkoaineisto. [http://www.volvopentastore.net/files/D12\\_MH.pdf](http://www.volvopentastore.net/files/D12_MH.pdf). Luettu 30.5.2018.

Volvo Penta. 2018. A History of Innovation. Verkkoaineisto. <https://www.volvopenta.com/brand/en-en/this-is-volvo-penta/about-us/history.html>. Luettu 7.8.2018.

WPCI. 2013. LNG fuel tank – Benefits and Challenges. Verkkoaineisto. <http://www.lngbunkering.org/lng/sites/default/files/2013%20DNV%20LNG%20fuel%20tank%20%E2%80%93%20benefits%20and%20challenges.pdf>. Luettu 10.7.2018.

Wärtsilä. 2017. LNG Shipping Solutions. Verkkoaineisto. <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/oil-gas-documents/brochure-lng-shipping-solutions.pdf>. Luettu 19.7.2018.

Wärtsilä Gas Solutions. 2017. Wärtsilä LNGPac™. Verkkoaineisto. <https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/ogi/fuel-gas-handling/brochure-ogi-lng-pac.pdf>. Luettu 19.7.2018.

Yanmar. 2015. Dual-Fuel Marine Engine (Highly Reliable Environmentally Friendly Engine). Verkkoaineisto. [https://www.yanmar.com/global/technology/technical\\_review/2015/0727\\_2.html](https://www.yanmar.com/global/technology/technical_review/2015/0727_2.html). Luettu 1.6.2018.

Zhao, Hua. 2010. Advanced direct injection combustion engine technologies and development. Cambridge: Woodhead.