

Olli Korvenranta

NESTEYTETYN MAAKAASUN KÄYTTÖ JA MAHDOLLISUUDET
MERENKULUSSA

Merenkulun koulutusohjelma

Merenkulkualan insinööri

2014

NESTEYTETYN MAAKAASUN KÄYTTÖ JA MAHDOLLISUUDET MERENKULUSSA

Korvenranta, Olli
Satakunnan ammattikorkeakoulu
Merenkulun koulutusohjelma
Maaliskuu 2014
Ohjaaja: Vanha-Aho, Tuula
Sivumäärä: 35
Liitteitä: -

Asiasanat: polttoaineet, maakaasu, kaasumoottorit, päästöt

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja selvittää merenkulussa kiristyvien päästö-
määrien myötä kysymykseen tulevien vaihtoehtoisten polttoaineiden vartenotetta-
vuutta ja mahdollisuuksia, mahdollisimman tuoretta ja luotettavaa aineistoa käyttäen.

Pääpaino erilaisten vaihtoehtojen joukossa oli erityisesti nesteytetyssä maakaasussa,
ottaen huomioon sen turvallisuus sekä edut ja haitat. Teemana läpi työn on lisäksi
maakaasun tietynlainen vertailu merenkulussa yleisesti käytettyjen polttoaineiden
ominaisuuksiin, niiden etuihin ja heikkouksiin. Tarkoitus oli keskittyä erityisesti ny-
kyajan ja tulevaisuuden suuntauksiin jättäen historia vähemmälle huomiolle, kuiten-
kaan kokonaan sitä unohtamatta.

Työhön sisältyy maakaasun ja siihen rinnastettavissa olevien kaasujen yleisen teori-
an, nesteytysprosessien sekä uudelleenkaasutuksen, erilaisten kaasumoottorityyppien
ja maakaasun käyttöön, siirtoon sekä varastointiin liittyvien laitteistojen tarkastele-
minen ja läpikäyminen.

USE AND POSSIBILITIES OF LIQUEFIED NATURAL GAS IN SHIPPING

Korvenranta, Olli
Satakunta University of Applied Sciences
Degree Programme in Maritime Management
March 2014
Supervisor: Vanha-Aho, Tuula
Number of pages: 35
Appendices: -

Keywords: fuels, natural gas, gas engines, emissions

The objective of this thesis was to research and clarify alternative fuels' usage and possibilities as a result of tightening regulations in shipping regarding vessels' emissions, using as recent and reliable source material as possible.

Among the different fuels the weight was especially in liquefied natural gas, taking safety issues and its pros and cons into consideration. In addition a continuing theme was a certain kind of comparison of natural gas to other fuels more commonly used in shipping; considering up- and downsides. The purpose was to focus especially on present-day and future technologies and trends, leaving lesser room for history.

The thesis includes the examination of natural gas's and parallel gases' general theory, liquefaction processes and regasification, different kinds of gas engines, and the equipment regarding natural gas's usage, transfer and storage.

LYHENTEET JA TERMIT:

IMO = International Maritime Organisation, kansainvälinen merenkulkujärjestö

ECA = Emission Control Area, päästöjen valvonta-alue

SECA = Sulphur Emission Control Area, rikkidioksidipäästöjen valvonta-alue

LNG = Liquefied Natural Gas, nesteytetty maakaasu

LBG = Liquefied Bio Gas, nesteytetty biokaasu

LPG = Liquefied Petroleum Gas, nestekaasu

CNG = Compressed Natural Gas, paineistettu maakaasu

GTL = Gas-to-Liquids, kaasusta prosessoitavat puhtaat nestemäiset polttoaineet

NGL = Natural Gas Liquids, kaasukondensaatti

NTP = Normal Temperature and Pressure, normaaliolosuhteet

BOG = Boil Off Gas, uloskiehunut kaasu

RPT = Rapid Phase Transition, nopea faasimuutos

HFO = Heavy Fuel Oil, raskas polttoöljy

IFO = Intermediate Fuel Oil, raskas polttoöljy (98% raakaöljyä ja 2% tislattua öljyä)

MDO = Marine Diesel Oil, diesel-öljyä (sisältää hieman raskasta polttoöljyä)

MGO = Marine Gas Oil, tislattua öljyä

DF = Dual Fuel- eli kaksoispolttoainemoottori

FLNG = Floating Liquid Natural Gas, kelluva LNG –tuotantolaitos

CHP = Combined Heat & Power Plant, kombivoimalaitos

Bunkraus = Polttoainetäydennys

Propulsio/propulsiokoneisto = Aluksen työntövoiman kehittävä kulkukoneisto

Separointi = Veden ja epäpuhtauksien erotus öljystä keskipakoistekniikalla

Regasification = Uudelleenkaasutus

Reliquefaction = Uudelleennesteytys

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

LYHENTEET JA TERMIT

1	JOHDANTO	7
1.1	Aiheen perustelu ja tavoitteet	7
1.2	Termien selventäminen	8
2	YLEISESTI MAAKAASUSTA	8
2.1	Maakaasun koostumus ja ominaisuudet	8
2.1.1	Lämpöarvot	10
2.1.2	Syttymisrajat	11
2.1.3	Palaminen ja savukaasut	12
2.2	Biokaasu	12
2.3	Nestekaasu	13
2.4	CNG	13
2.5	Maailman maakaasuvarat	14
3	MAAKAASUN NESTEYTYSPROSESSI	15
3.1	Nesteyttämisestä yleisesti	15
3.2	Erilaisia nesteytystekniikoita	16
3.2.1	AP-SMR ja AP-C3MR	16
3.2.2	ConocoPhillips Optimized Cascade	17
3.2.3	Shell DMR	17
3.2.4	Linde	18
3.3	FLNG- eli kelluva LNG-tuotantolaitos	19
3.4	LNG-terminaalit	20
3.5	LNG-tankkerit	21
3.6	GTL (Gas-to-Liquids)	22
4	MAAKAASUN TURVALLISUUS, EDUT JA HAITAT	23
4.1	Nesteytettynä	23
4.2	Kaasuna	23
5	VARASTOINTI JA LAITTEISTO ALUKSELLA	25
5.1	Varastointi ja laitteisto	25
5.2	Jälkiasennus	25
6	KAASUMOOTTORITYYPPEJÄ	26
6.1	Kaasuottomoottori	26

6.2 Kaasudieselmoottori.....	27
6.3 Dual Fuel- eli kaksoispolttoainemoottori.....	27
7 KAASUTURBIINI.....	28
8 POLTTOKENNO	29
9 YHTEENVETO.....	31
LÄHTEET.....	32
LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Aiheen perustelu ja tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää nesteytetyn maakaasun käyttöä ja mahdollisuuksia merenkulussa käyttäen hyväksi mahdollisimman tuoretta tietoa ja pitää katse koko ajan myös tulevaisuudessa.

Vuonna 2015 astuu voimaan IMO:n toimeenpanema EU-direktiivi, jonka mukaan alusten polttoaineiden rikkipitoisuus saa olla enintään 0,1%. Tämä koskee tiettyjä merialueita, joita kutsutaan SECA-alueiksi (*Sulphur Emission Control Area*). Polttoaineratkaisuiksi tämän vaatimuksen täyttämiseksi varustamot ovat miettineet nykyisin yleisesti käytössä olevien polttoaineiden matalarikkisiä versioita, rikkipesurien asennusta pakokaasujen puhdistamiseksi sekä maakaasun, biopolttoaineiden, metanolin ja muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöä.

Maailman merialueita on siis jaettu omiin ECA-alueisiinsa, joissa on määritelty vaatimukset typpi-, rikki- ja hiukkaspäästöille. Näitä alueita ovat nykyään Itämeren SECA, Pohjanmeren SECA, Pohjois-Amerikan ECA ja Karibian ECA. Alueita määritellään tulevaisuudessa mahdollisesti enemmän. (Suomen varustamot 2013.)

Tämä opinnäytetyö keskittyy erityisesti maakaasuun kaasumaisessa sekä nestemäisessä olomuodossa, mutta sivuaa myös hieman muita vaihtoehtoisia polttoaineita. Aihe on alati kiristyvien ympäristömääräysten vuoksi erittäin ajankohtainen nesteytetyn maakaasun ollessa ympäristölle haitattomampi vaihtoehto kuin muut fossiiliset polttoaineet.

Omasta mielestäni aihe on mielenkiintoinen ja tulevaisuudessa omassa työssä kehittymisen kannalta myös tarpeellinen. Aihe on tuntunut kiinnostavalta ja tullut mieleen useasti opintojen ohessa, joten on hyvä tilaisuus päästä tutkimaan tärkeältä tuntuvaa aihetta ja selvittää se itselle sekä muille perusteellisesti opinnäytetyön muodossa.

Pääpaino on erilaisissa aluksiin asennettavissa ja suunnitteilla olevissa moottori- ja laitteistoratkaisuissa, nesteytetyn maakaasun hyvissä ja huonoissa puolissa laivan polttoaineena ympäristö- ja turvallisuusnäkökohdat huomioonottaen sekä maakaasun yleisen teorian ja nesteytysprosessien selvityksessä.

1.2 Termien selventäminen

Aihepiirin termit ja lyhenteet on tarpeellista selventää alussa sekaannusten välttämiseksi. Useissa eri yhteyksissä puhutaan LNG:stä eli nesteytetystä maakaasusta polttoaineena ja ”LNG:tä polttoaineena käyttävästä aluksesta” ja tämä onkin periaatteessa oikein. Tarkemmin LNG on maakaasun nestemäinen olomuoto, jossa se kuljetetaan ja varastoidaan merillä, teillä ja terminaaleissa. LNG:nä siitä ei kuitenkaan ole moottorin polttoaineeksi, vaan vasta uudelleenkaasutettuna (*regasification*) erillisellä laitteistolla se voidaan syöttää moottorin polttoaineeksi. Näistä seikoista yksityiskohdaisemmin luvuissa 3, 5 ja 6.

2 YLEISESTI MAAKAASUSTA

2.1 Maakaasun koostumus ja ominaisuudet

Maakaasu on fossiilista luonnonkaasua, jota saadaan syvältä maankuoren alta. Sen koostumus vaihtelee riippuen tuotantolähteestä ja maantieteellisestä sijainnista. Maakaasun pääkomponentti on aina metaani (CH_4) riippumatta tuotantolähteestä; muita komponentteja ovat etaani (C_2H_6), propaani (C_3H_8), butaani (C_4H_{10}), typpi (N_2) ja hiilidioksidi (CO_2). Esimerkiksi Siperialainen maakaasu sisältää 98% metaania ja muiden ainesosien osuus on hyvin pieni (<1,0%). Korkean metaanipitoisuutensa ansiosta se soveltuu hyvin nimenomaan poltettavaksi. Saksalainen, Amerikkalainen ja Hollantilainen maakaasu sisältää 81 - 88% metaania, mutta myös huomattavasti typpeä (8,4 - 14,3%) ja etaania (1,0 - 6,7%). (Maakaasukäsikirja 2010, 6-7.)

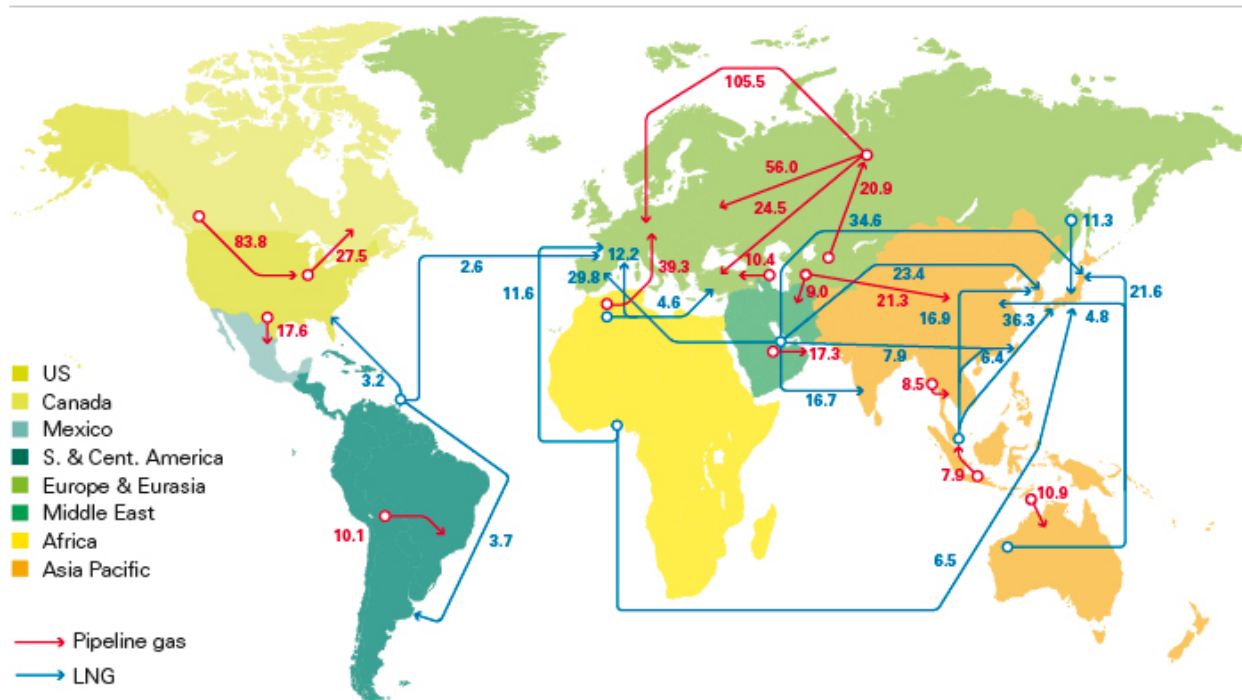
Maakaasun tiheys on kaasuna $0,7 - 0,9 \text{ kg/m}^3$ ja nesteytettynä $410 - 500 \text{ kg/m}^3$. Vertailukohtina merenkulussa yleisesti käytetyn HFO:n tiheys on 930 kg/m^3 ja MDO:n 835 kg/m^3 . (The Engineering Toolbox 2013.)

Maakaasua kuljetetaan maakaasukentiltä korkeapaineisia putkia pitkin kuluttajille. Sitä käytetään lämmitykseen, sähköntuotantoon, raaka-aineena kemianteollisuudessa sekä ammatiliikenteessä- ja merenkulussa. Merkittävämpiä maakaasupohjaisia tuotteita kemianteollisuudessa ovat muovit, metanoli sekä ammoniakki. Siperialaista maakaasua Suomeen toimittaa Gazprom Imatran kautta ja se kulkee n. 1200 km pitkää siirtoputkistoa pitkin, jonka matkan varrella on n. 200 kuluttajaa.

Kuva 1. Putkikaasun ja LNG:n merkittävä liikkuminen maailmalla vuonna 2012, yksikkö mrd. m^3 . (BP 2012.)

Natural gas major trade movements 2012

Trade flows worldwide (billion cubic metres)



Maakaasun osuus energian kokonaistuotannosta on n. 25% koko maailmassa; Suomessa n. 11%. Se on kokonaan rikitöntä, joka on yksi sen tärkein polttoainekäyttöä puoltava seikka aluksissa erityisesti usein käytetyn raskaan polttoöljyn (*HFO*, *IFO*) sijasta. Se ei sisällä kiinteitä aineita, kondensaatteja eikä elimistöille ja ympäristölle haitallisia raskasmetalleja. (Maakaasukäsikirja 2010, 6-7 & Klemola 2013, 3.)

Maakaasua hajustetaan yleensä epämiellyttävän pistävän hajuisella tetrahydrotiofeenilla mahdollisten vuotojen havaitsemisen helpottamiseksi. Tetrahydrotiofeeni on terveydelle haitallista ja helposti syttyvää, mutta sitä käytetään hajustamiseen niin pieniä määriä, että nämä mahdollisuudet on eliminoitu. (Gasum 2013.)

Viimeaikoina on alettu hyödyntää myös syvällä olevia liuskekaasuesiintymiä, joista saadaan maakaasua poraamalla kalkki- ja liuskekiviä. Vaikka tällä keinolla saadaan lisää energiavaroja hyödynnettäväksi, siinä on kuitenkin monia huonoja puolia:

- hankalampi tuottaa, josta seuraa suuremmat kasvihuonepäästöt kuin normaalisti maakaasulla,
- huonoja vaikutuksia pohjavesiin sen tuotannossa käytettävistä lukuisista kemikaaleista johtuen ja metaanin päästessä sinne,
- tuotannon seurauksena syntyy jätevesialtaita ja näistä huolehtiminen on iso kysymysmerkki,
- laskee maakaasun hintaa radikaalisti, joten energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvaan energiaan investoiminen jää helposti toiseksi. (Klemola 2013, 9-10.)

2.1.1 Lämpöarvot

Maakaasun lämpöarvo on sen tärkeimpiä ominaisuuksia polttotekniseltä kannalta. Sen ylempi eli kalorimetrinen lämpöarvo on 55,3 MJ/kg. Alempi eli tehollinen lämpöarvo on 50 MJ/kg, käytännönläheisemmin ilmaistuna 13,9 kWh/kg. Vertailukohtina HFO:n tehollinen lämpöarvo on n. 11,3 kWh/kg ja MDO:n n. 11,8 kWh/kg. Tehollisen lämpöarvon johdosta 1 m³ maakaasua (NTP) vastaa lämpöarvoltaan n. 1 litraa kevyttä polttoöljyä. Ylempi lämpöarvo käsittää savukaasujen sisältämien vesihöyryjen lauhtumislämmön, eli 5,3 MJ/kg. Ylemmällä lämpöarvolla on käytännön merkitystä, koska maakaasun rikittömyydestä johtuen voidaan osa lauhtumislämmöstä hyödyntää lämmöntalteenottokattiloilla, mm. kombivoimalaitoksissa, ja näin saadaan hyötysuhdetta paremmaksi. (Maakaasukäsikirja 2010, 7.)

Energiakaasut jaetaan kolmeen kaasuryhmään Wobbe-arvon perusteella, joka laskeaan kaasun lämpöarvon ja tiheyden perusteella. Tiheys voidaan laskea NTP-

olosuhteissa jakamalla molekyylipaino 1 moolin tilavuudella, eli 22,414 litralla. Wobbe-arvo itsessään lasketaan jakamalla ko. kaasun lämpöarvo sen suhteellisen tiheyden neliöjuurella. Wobbe-arvon yksikkönä käytetään BTU:a (*British Thermal Unit*) yhtä kuutiojalkaa kohden tai MJ/m³. 1 BTU vastaa n. 1,055 MJ:a.

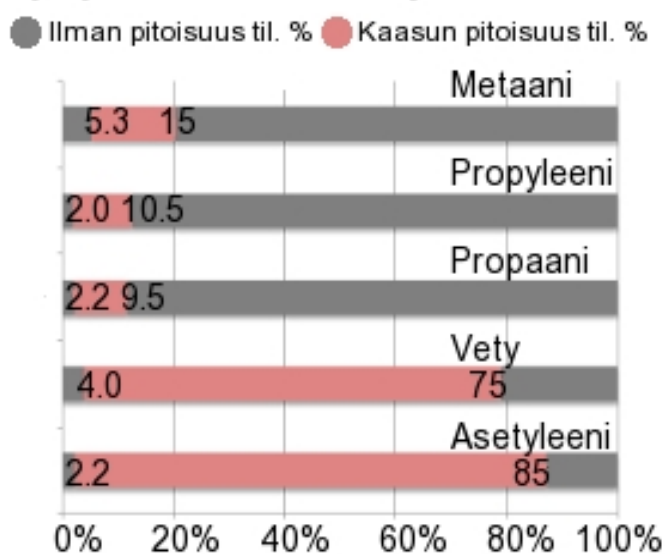
Maakaasut kuuluvat toiseen kaasuryhmään ja Suomessa yleisesti käytetty maakaasu kuuluu sen ensimmäiseen alaryhmään, joka ilmaisee sillä olevan ryhmän korkein lämpöarvo. Kaasulaitteet luokitellaan vastaavasti omiin luokkiinsa, koska vain Wobbe-arvoltaan samansuuruiset kaasut soveltuvat käytettäväksi yhden kaasulaitteen- tai polttimen kanssa, ilman että suuttimia tai paineensäätimiä tarvitsee muuttaa. (Maakaasukäsikirja 2010. 7-8.)

2.1.2 Syttymisrajat

Syttyäkseen maakaasua pitää olla ilmassa vähintään 5 til-%, mutta alle 15 til-% 20 °C lämpötilassa. Palamisilman lämpötila ja happipitoisuus vaikuttaa näihin syttymisraja-arvoihin. Lämpötilan kasvaessa syttymisalue laajenee; 200 °C:n lämpötilassa raja-arvot ovat 4,2 ja 14,7 til-% eli syttymisalue on laajentunut 5 %. Hapessa 20 °C:n lämpötilassa syttymisraja on 5,0–60,0 til-%. (Maakaasukäsikirja 2010. 12-13.)

Kuva 2. Palavien kaasujen syttymisrajoja. (AGA 2012.)

Syttyvien seoksien rajat



Kaasuille ominaiseen tapaan maakaasun syttymislämpötila on korkea, n. 600 – 650 °C, mutta se ei kuitenkaan vaadi syttyäkseen kovin isoa energiamäärää. (Maakaasukäsikirja 2010. 12-13.)

2.1.3 Palaminen ja savukaasut

Maakaasun pääkomponentin, metaanin, palaminen voidaan esittää yksinkertaistettuna reaktioyhtälönä: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$. Se palaa siis hiilidioksidiksi ja vesihöyryksi. Poltettaessa 1 m³ maakaasua (NTP) saadaan lämpöenergiaa n. 10 kWh ja sivutuotteena muodostuu n. 1,6 kg vettä ja n. 2 kg hiilidioksidia. Koko maakaasuseoksen palamisreaktio on monimutkainen tapahtuma, joka sisältää satoja erilaisia reaktioita ja välivaiheita.

Metaanin teoreettinen eli stökiometrinen palamisilman määrä on 9,6 m³, mutta käytännössä sen täydellinen palaminen vaatii hieman ylimääräistä ilmaa eli yli-ilmaa. Tästä yli-ilmamäärästä muodostuu ilmakerroin. Se voi olla niinkin hyvä kuin 1,1; tällä saadaan paras palamisen hyötysuhde. Ilmakertoimen kasvaessa hyötysuhde pienenee riippuen savukaasujen lämpötilasta; pienillä lämpötiloilla loivemmin ja suurella jyrkemmin. Tarkka, kaikki komponentit huomioon ottava teoreettinen palamisilman minimimäärä voidaan laskea kun tiedossa on kaikki reaktiot, aineiden moolimäärät, massat ja tiheydet sekä ilman koostumus. Hyvän palamisen takaamiseksi ilmaa ei saa olla alle teoreettisen määrän, muuten palamisen yhteydessä muodostuu häkää ja hiilivetyjä jää palamatta. (Maakaasukäsikirja 2010. 12-13.)

2.2 Biokaasu

On hyvä selvittää myös pääpiirteiltään samantyyppisten kaasujen ominaisuuksia.

Biokaasu on uusiutuvaa ja siten ympäristöystävällistä energiaa, jota saadaan kolmella tavalla. Yksi tapa on tuottaa sitä biokaasureaktorissa biomassasta, joka koostuu mm. lietteestä, lannasta ja jätteestä. Näin tuotettu biokaasu sisältää suurimmaksi osaksi metaania (40 - 75%), mutta lisäksi myös runsaasti hiilidioksidia (30 - 45%). Toisella

tavalla sitä saadaan keräämällä kaatopaikoilla muodostuvaa kaasua; näin saadun raakakaasun koostumus vaihtelee suuresti, koska se on muodostunut lajittelemattomista jätteistä. Kolmas tapa on puun kaasutus. Tässä menetelmässä saadaan kiinteän biomassan, mm. metsähakkeen kaasutusprosessin jälkeen tuotekaaasua, joka käsitellään vielä metanointiprosessissa niin, että lopputulos sisältää vähintään 95% metaania; suurinpiirtein saman verran kuin maakaasu yleisesti ottaen.

Metaania hyödyntämällä biokaasua voidaan maakaasun tavoin jalostaa polttoaineeksi. Sitä voidaan myös nesteyttää kuljetusta ja varastointia varten, jolloin siitä käytetään lyhennettä LBG (*Liquefied Bio Gas*). Maakaasun jakelussa ja varastoinnissa hyväksi todettuja tekniikoita voidaan soveltaa myös biokaasulle. (Gasum 2013.)

2.3 Nestekaasu

Nestekaasu on yhteinen kaupp nimi propaanista (C_3H_8) ja butaanista (C_4H_{10}) koostuvalle kaasulle; siitä käytetään yleisesti ja maailmanlaajuisesti lyhennettä LPG (*Liquefied Petroleum Gas*). Sitä saadaan kaasukondensaattien (*Natural Gas Liquids, NGL*) prosessoinnista ja raakaöljystä jalostamalla. Se on 1,5 kertaa ilmaa raskaampaa hyvin palavaa, hajutonta ja väritöntä kaasua. Turvallisuuden vuoksi siihen lisätään hajusteita, jotta mahdolliset vuodot voidaan havaita.

Puhtaiden palamisominaisuuksiensa ansiosta sitä voidaan käyttää hyvin sisätiloissa käytettävien koneiden, mm. trukkien, polttoaineena. Lisäksi sitä käytetään teollisuudessa, kasvihuoneissa lämmön ja hiilidioksidin tuottamiseksi sekä suuren lämpöarvonsa vuoksi, n. 12,8 kWh/kg mm. ravintoloiden keittiöissä. Nestekaasun syttymislämpötila on n. 500 °C. (AGA 2012 & World LP Gas Association 2013.)

2.4 CNG

CNG (*Compressed Natural Gas*) eli paineistettu maakaasu on liikennekäyttöön tarkoitettu maakaasun muoto. Hiljattain on alettu miettimään myös CNG:n soveltamista merenkulkuun LNG:n tapaan. CNG voisi toimia yhtenä vaihtoehtona maakaasuput-

ken ja LNG:n välillä, missä näitä muotoja ei ole taloudellisesti tai muuten järkevä soveltaa.

Se paineistetaan erittäin korkeaan 200 baarin paineeseen ja säilytetään ajoneuvoissa kestävässä teräksestä, kuituvahvisteisesta alumiinista tai komposiittimateriaaleista valmistetuissa säiliöissä. CNG vie kolminkertaisen tilan verrattuna LNG:n, mutta toisaalta sitä ei tarvitse jäähdyttää alhaiseen lämpötilaan. Gasumilla on kaksikymmentä tankkausasemaa Suomessa, joissa voi tankata paineistettua maakaasua tai bio-kaasua. (Neptune Gas Technologies 2013 & Gasum 2013.)

2.5 Maailman maakaasuvarat

Nykykulutuksella maakaasuvarojen arvioidaan riittävän noin sadaksi vuodeksi; mahdollisen lisääntyvän kulutuksen myötä oletettavasti hieman vähemmäksi ajaksi. Tämä ei kuulosta kovin pitkältä ajalta, mutta huojentaa kuitenkin energiansaannin ja -kulutuksen kannalta ennen kuin vaihtoehtoisia uusia tai jo olemassa olevia tekniikoita aletaan hyödyntää.

Koko maailmassa suurimmat varannot ovat Venäjällä (33%), 48000 miljardia kuutiometriä. Euroopan osuus on n. 2,2%, josta yksin Norjan osuus on huomattava, n. 3000 miljardia kuutiometriä. Suomella ei ole omia maakaasuvaroja, mutta Suomi sijaitsee hyvien maakaasuesiintymien keskellä, joten sen saanti on ainakin teoriassa taattu. Maakaasun hankintaa Suomeen yritetään jatkuvasti kehittää ja monipuolistaa, mm. Suomen ja Viron välille on ollut EU-komission hankkeessa vuodesta 2008 lähtien suunnitelmissa rakentaa maakaasuputki. (Gasum 2013 & Työ- ja elinkeinoministeriö 2013).

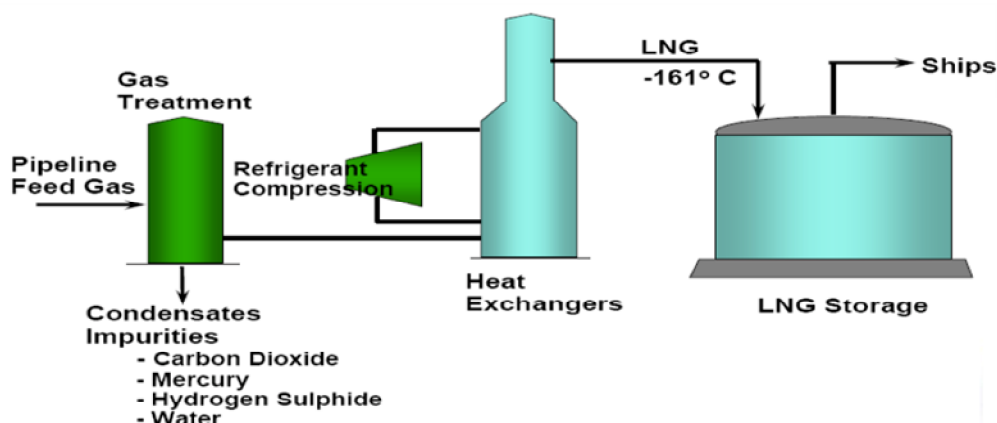
3 MAAKAASUN NESTEYTYSPROSESSI

3.1 Nesteyttämisestä yleisesti

Nesteytettyinä maakaasu on tilavuudeltaan 1/587 sen tilavuudesta kaasumaisessa olomuodossa NTP-tilassa; näin sitä voidaan kuljettaa ja varastoida huomattavasti helpommin. Tämä on tärkein peruste maakaasun nesteyttämiselle.

Maakaasun pääkomponentin, metaanin, kiehumispiste on erittäin alhainen $-161,5^{\circ}\text{C}$, joten se saadaan nestemäiseksi jäädyttämällä se alle tämän lämpötilan. Nesteytettyinä maakaasu on hapetonta, hajutonta, myrkytöntä ja väritöntä.

Kuva 3. Yleiskuva maakaasun nesteytysprosessista. (2b1st Consulting www-sivut 2012.)



Kuvassa 2 on yksinkertaistetusti esitetty nesteytysprosessi. Putkistosta kaasu kulkee käsittely-yksikköön, jossa siitä poistetaan alkutuotannon epäpuhtaudet eli hiilidioksidi, elohopea, rikkivety ja vesi sekä kondensaattit. Lämmönvaihtimilla kylmäaineen avulla se muunnetaan nestemäiseen olomuotoon ja siirretään LNG-varastotankkeihin odottamaan siirtoa edelleen aluksiin ja muuhun käyttöön.

Maailmassa on n. 35 LNG-tuotantolaitosta ja n. 15 rakenteilla. Gasumilla on Suomessa yksi LNG-tuotantolaitos Porvoon Kilpilahdessa, joka on toiminut vuodesta 2010. Siellä tuotetaan vuodessa n. 20000 tonnia LNG:tä ja se varastoidaan n. -150°C :n lämpötilassa kolmeen 700 m^3 säiliöön, jotka sijaitsevat laitoksen yhteydessä.

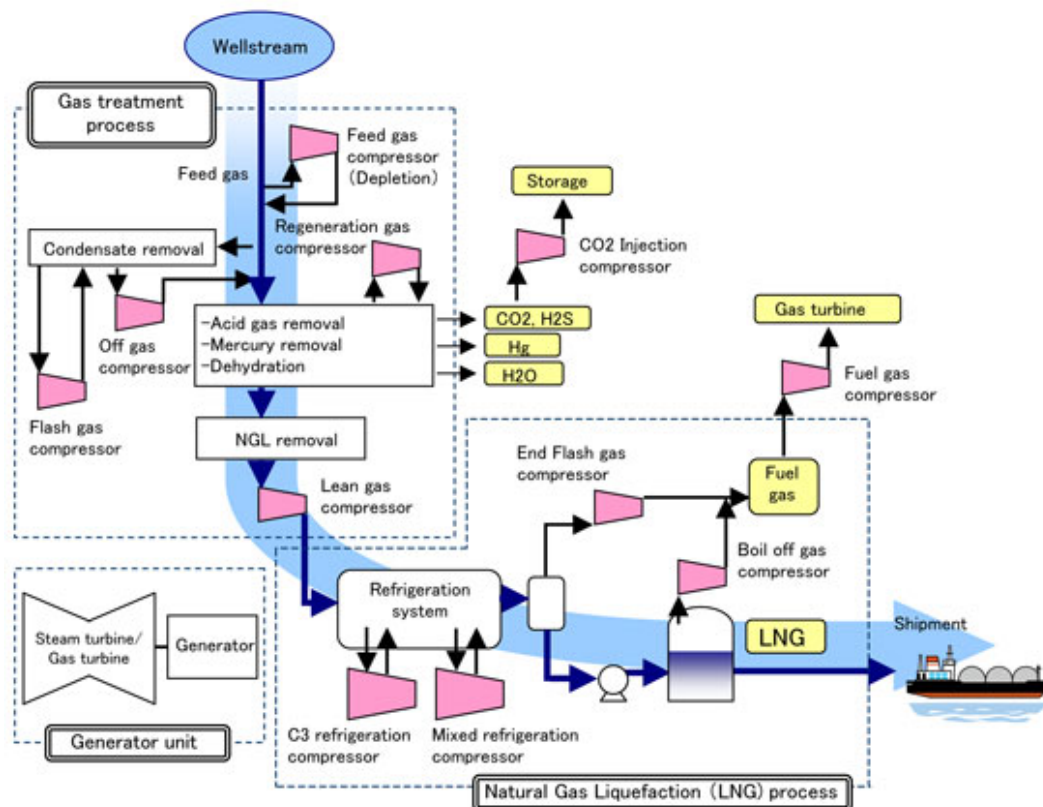
Laitos on kokonaan automatisoitu asianmukaisilla turvajärjestelmillä, kuten palo- ja kaasunvalvonnalla, varustettuna ja sitä valvotaan Kouvolan keskusvalvomosta ympäri vuorokauden. Varastosäiliöistä uloskiehuva kaasu (*BOG, Boil Off Gas*) sekä jäännöskaasut menee lähellä sijaitsevan voimalaitoksen käyttöön. (Gasum 2014.)

3.2 Erilaisia nesteytystekniikoita

3.2.1 AP-SMR ja AP-C3MR

Nämä ovat APCI:n (*Air Products & Chemicals Incorporation*) kehittämiä tekniikoita. AP-SMR (*Single Mixed Refrigerant*) –prosessissa nesteytys tapahtuu erityisten kierukkalämmönvaihtimien ja kylmäaineen avulla. AP-C3MR –prosessissa hyödynnetään propaania kylmäaineen esijäähdytykseen; prosessilla on erittäin hyvä hyötysuhde. Nämä ovat yleisimmin käytettyjä nesteytystekniikoita keskikokoisilla LNG-tuotantolaitoksilla. (Air Products 2013.)

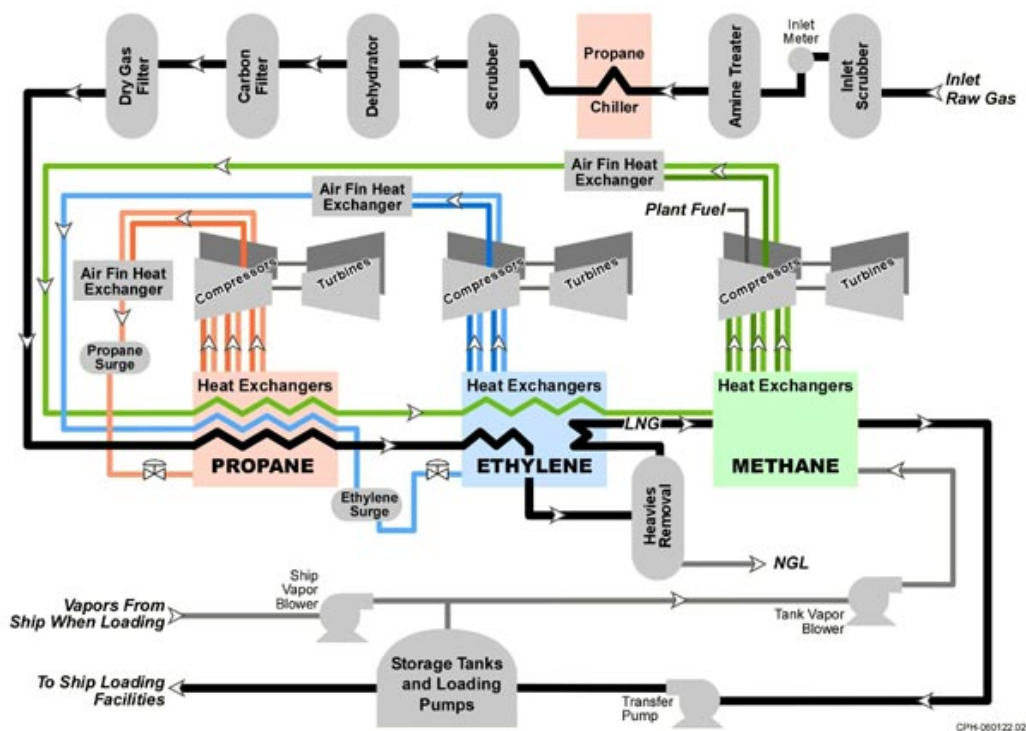
Kuva 4. APCI C3-MR –nesteytysprosessi. (Mitsubishi Heavy Industries 2010.)



3.2.2 ConocoPhillips Optimized Cascade

Prosessiin tuleva maakaasu käsitellään erilaisin pesurein ja suodattimin sekä esijähdytetään propaanijäähdyttäjällä, jonka jälkeen se propaani-, etyleeni- ja metaanilämmönvaihtimien avulla muunnetaan LNG:ksi. Jokaisella lämmönvaihtimella on omat turbiininsa ja kompressorinsa. Etyleenilämmönvaihtimen jälkeen siitä poistetaan rasakat hiilivedyt ja kondensaatit, jonka jälkeen se metaanilämmönvaihtimen kautta kulkee varastotankkeihin. Varastotankeista ja aluksista lastatessa uloskiehuvia kaasuja hyödynnetään tuomalla ne prosessiin puhaltimien avulla.

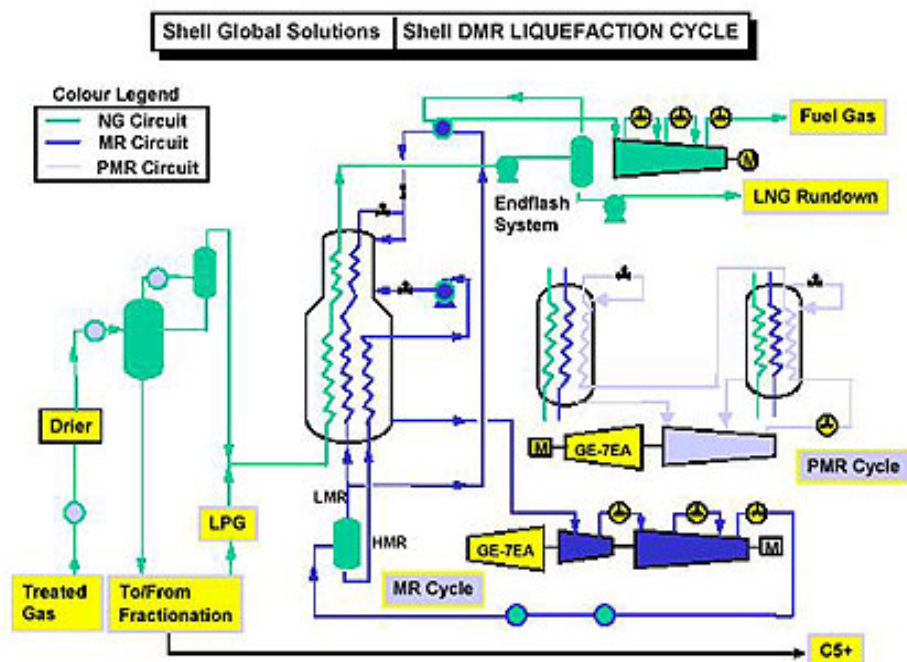
Kuva 5. ConocoPhillips Optimized Cascade -nesteytysprosessi. (Offshore Technology 2013.)



3.2.3 Shell DMR

Prosessin lyhenne DMR tulee sanoista *double mixed refrigerant*, joka tarkoittaa prosessissa käytettävää jäähdytysaineseokitusta. Tällainen tekniikka on hyödyllinen erityisesti paikoissa, joissa on suuria lämpötilan vaihteluita.

Kuva 6. Shell DMR –nesteytysprosessi. (Hydrocarbons Technology 2012.)

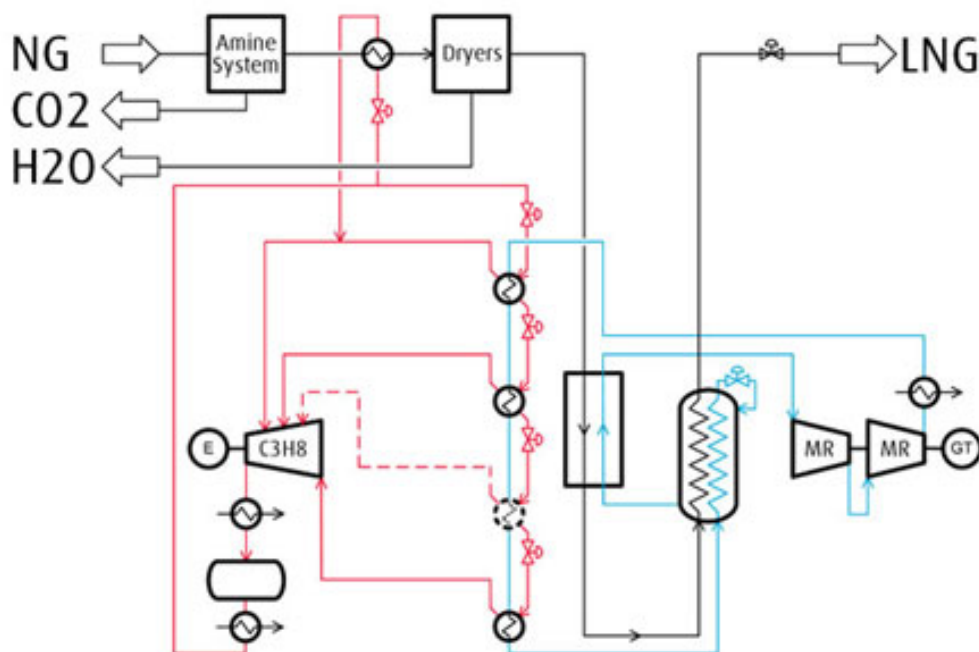


Kuvassa 6 *NG (Natural gas) Circuit* tarkoittaa maakaasupiiriä, *MR (Mixed refrigerant) Circuit* jäähdytysainesekoituksen piiriä sekä *PMR (Precooling mixed refrigerant) Circuit* esijäähdytyspiiriä, jossa etaanista, propaanista ja pieneksi osaksi metaanista ja butaanista koostuvalla sekoituksella maakaasu esijäähdytetään. Kuvasta selviää kunkin piirin kulku lämmönvaihtajien ja muiden komponenttien läpi. Turbiinien ja kompressorien avulla pyöritetään prosessia. (Oil & Gas Journal 2002.)

3.2.4 Linde

Prosessia käytetään pienissä ja keskikokoisissa LNG-tuotantolaitoksissa. Prosessiin tulevasta maakaasusta poistetaan hiilidioksidi ja vesi. Se esijäähdytetään propaanilla ja muutetaan nestemäiseksi ja alijäähdytetään jäähdytysainesekoituksella. Sillä on hyvä hyötysuhde ja laitteistoa tarvitaan suhteellisen vähän verrattuna muihin nesteytysprosesseihin. (Linde Engineering 2013.)

Kuva 7. Linde –nesteytysprosessi. (Linde Engineering 2013.)



3.3 FLNG- eli kelluva LNG-tuotantolaitos

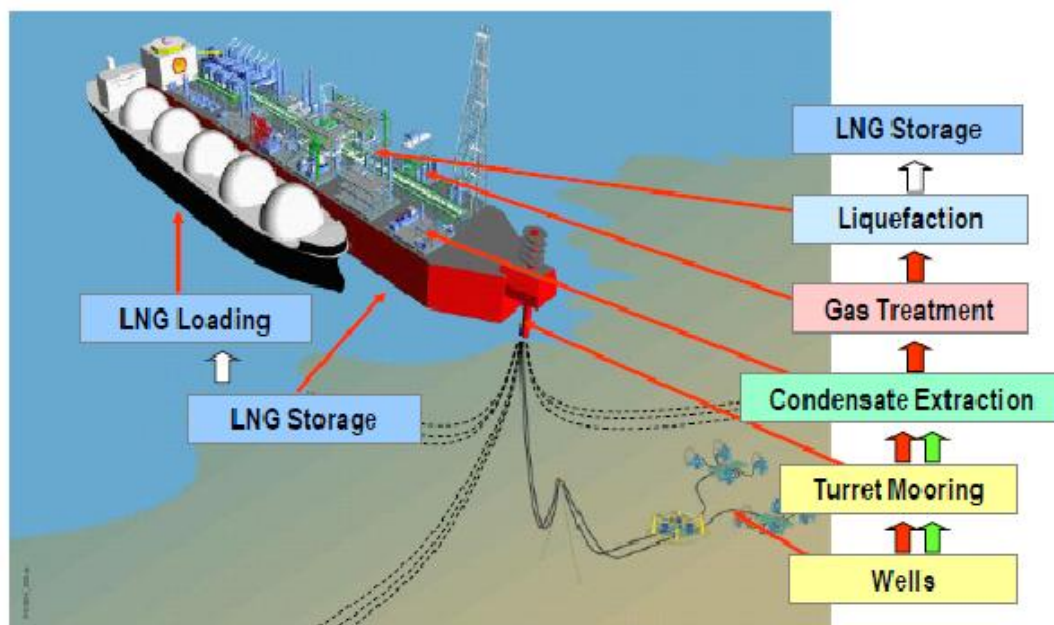
FLNG on uutta, vasta muutamien lähivuosien aikana kehitettyä tekniikkaa. Kelluval- la tuotantolaitoksella voidaan hyödyntää kaasuesiintymiä, jotka sijaitsevat kaukana olemassa olevasta infrastruktuurista. Se tulee myös kysymykseen vaihtoehtona, kun maalle rakennettavan laitoksen kustannukset olisivat liian suuret. Näiden seikkojen ansiosta tuotantotavalle odotetaan suurta kysyntää ja mahdollisuuksia. (Höegh LNG 2013.)

Shell valmistaa ensimmäistä kelluvaa tuotantolaitosta, Prelude FLNG:ä. Valmistuttuaan se tulee operoimaan läntisessä Australiassa. LNG- ja LPG –tankkerit voivat tankata tällaisesta laitoksesta helposti ja kuljettaa sitä eteenpäin. Koko laitos on valmistuttuaan 488 metriä pitkä ja 74 metriä leveä ja syrjäyttää 600000 tonnia vettä; se on samalla maailman suurin kelluva offshore-tuotantolaitos.

Kaasun jäädyttämisessä käytetään hyväksi syvällä olevaa vettä ja näin ei tarvita niin paljon laitteistoa itse laitokselle. Metrin halkaisijaltaan olevia putkia lähtee laitoksel-

ta merenpinnasta 150 metrin syvyyteen, jotka kuljettavat merivettä laitokselle. (Shel-
lin www-sivut 2013.)

Kuva 8. Yleiskuva Prelude FLNG –tuotantolaitoksesta ja prosessin vaiheista. (Interesting Engineering 2013.)



Kuvassa 8 *turret mooring* tarkoittaa aluksen erityistä kiinnitystekniikkaa. Se on suunniteltu pitämään alus paikoillaan kovissakin trooppisissa sykleoneissa ja myrskyissä. *Wells* tarkoittaa varsinaista lähdettä, josta maakaasu saadaan. Laitoksessa siitä poistetaan kondensaattit ja kaasu käsitellään, jonka jälkeen se nesteytetään ja varastoidaan. LNG -tankkerit voivat tankata laitoksen varastotankeista, joihin tarpeen mukaan tuotetaan lisää LNG:a.

3.4 LNG-terminaalit

Terminaleihin tuodaan tuotantokentiltä tankkerikuljetuksilla maakaasua nestemäisessä muodossa. Kaksiseinäisissä hyvin eristetyissä varastotankeissa se säilytetään nesteytettynä, mutta boil-off –ilmiötä ei voi täysin välttää, eli osa LNG:stä kiehuu tankeista ulos. Erillisellä kiertoprosessilla tätä uloskiehunutta kaasua (*BOG*) voidaan kuitenkin kompressoreilla ja uudestaan lauhduttamalla syöttää takaisin tankeihin. Varastotankeista LNG muutetaan takaisin kaasuksi kysynnän mukaan ja syötetään maakaasuverkostoihin. (Elengy 2013.)

Maailmassa on n. 85 LNG-terminaalia sekä n. 20 rakenteilla. Suomeen on suunnitteilla Gasumin toimesta kaksi LNG-terminaalia, yksi Pansion satamaan Turkuun sekä yksi Inkoon Joddböleen tai Porvoon Tolkkisiin. Jälkimmäinen on siis vielä sijainniltaan auki ja kulkee projektinimellä Finngulf LNG. Näillä näkymin se on määrä ottaa käyttöön vuoden 2018 syksyllä. Finngulf LNG:n liittyy myös Balticconnector-projekti, jossa on tarkoitus rakentaa Suomen ja Viron välille Suomenlahdelle molempiin suuntiin kaasua kuljettava merenalainen kaasuputki. (Gasum 2013.)

Porin Tahkoluotoon on myös suunnitteilla LNG-terminaali kahden kaasuyhtiön toimesta. Toteutuessaan tällainen hanke toisi paljon mahdollisuuksia LNG-tankkerikuljetuksille ja LNG-säiliörekoille Satakunnan ollessa putkikaasuverkon ulottumattomissa. Lisäksi Suomen ja Baltian maiden yhteinen LNG-terminaali on suunnitteilla ja mahdollisuuksia sen rakentamiseksi tutkitaan parhaillaan EU-komission hankkeessa. (Alhosalo 2013, 28 & Työ- ja elinkeinoministeriö 2013).

3.5 LNG-tankkerit

LNG:n kuljettaminen tarkoitukseen rakennetulla tankkerilla on kallista, mutta toisaalta määrät ovat suuria; aina 200000 m³ asti yhtä tankkeria kohden.

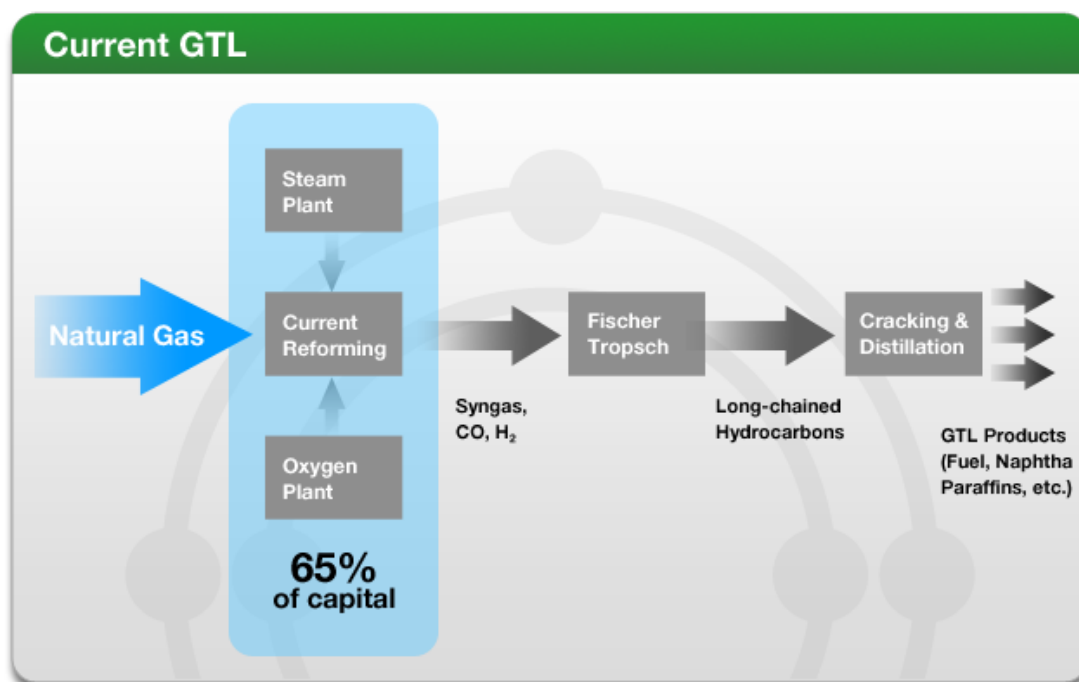
Tankkerit voivat käyttää propulsiokoneistona höyryturbiinia tai niillä voi olla kaksois- tai kolmoispolttoaineen dieselsähköinen propulsio (*Dual Fuel/ Tri-Fuel Diesel Electric Propulsion*). Höyryturbiinia käytettäessä LNG-tankeista uloskiehunutta kaasua (*BOG*) ohjataan putkistoja pitkin konehuoneeseen ja käytetään kattiloiden avulla pyörittämään höyryturbiinia. Suurilta osin ollaan kuitenkin alettu siirtymään dieselpropulsioon höyryturbiinin huonon, n. 35%, hyötysuhteen vuoksi.

BOG:a voidaan käyttää Dual Fuel –moottorissa niin, että sitä käytetään sähköä tuottavaa generaattoria pyörittävän voimakoneen polttoaineena ja erillistä sähkömoottoria käytetään propulsioon. BOG:a voidaan myös suoraan käyttää itse propulsioon tuottavan voimakoneen polttoaineena. (Bright Hub Engineering 2011.)

3.6 GTL (Gas-to-Liquids)

Yksi keino saada maakaasua käyttöön hankalista paikoista (*stranded gas*) on tuottaa siitä ns. Fischer-Tropsch –nesteitä eli nestemäisiä polttoaineita: dieseliä, naftaa, kerosiinia, voiteluöljyä sekä vaha. Nimitys Fischer-Tropsch tulee prosessin alkuperäisistä kehittäjistä, jotka onnistuivat 1920-luvulla saamaan hiilestä nestemäistä polttoainetta. Shell ja ExxonMobil ovat tässä maakaasun kannalta melko uudessa tekniikassa aktiivisia toimijoita ja Shelliltä valmistui hiljattain Qatarin GTL-tuotantolaitos.

Kuva 9. Yleiskuva maakaasusta tuotettavien nestemäisten polttoaineiden tuotantoprosessista. (Carbon Sciences 2008.)



Tekniikkaa erityisesti suosiva seikka on, että sen tuloksena saatavilla nestemäisillä polttoaineilla on raakaöljystä saatavien polttoaineiden hyviä ominaisuuksia ilman niiden epäpuhtauksia ja kuitenkin tavanomaisten polttoaineiden hyötysuhteet säilyvät. Toisaalta sillä on myös paljon haittapuolia, kuten sen teknologian hankaluus ja energiatehokkuus eli prosessiin kuluu nykyisillä tekniikoilla liikaa energiaa suhteessa siitä saatavaan lopulliseen hyötyyn. (Klemola 2013, 18-19 & Natgas.info.)

4 MAAKAASUN TURVALLISUUS, EDUT JA HAITAT

4.1 Nesteytettynä

LNG höyrystyy välittömästi ilmaan joutuessaan ja tämä on syytä ottaa käyttöturvallisuudessa huomioon. Kryogeenisenä aineena se aiheuttaa ihmiselle sekä koneelle ongelmia vuoto- ja valumistilanteessa. Kuten jo aikaisemmin mainittu, nesteytettynä maakaasun etu on lyömätön varastoinnin ja siirron kannalta sen viedessä murto-osan tilaa nestemäisessä olomuodossa.

LNG:tä käsiteltäessä on tärkeää ymmärtää sen nopeat faasimuutokset (*Rapid Phase Transitions, RPT*). Ilmiö saa aikaan erittäin nopean kylmän LNG:n höyrystymisen esim. veden päästessä kosketuksiin LNG:n kanssa varastotankissa. LNG:n vuotaessa aluksen tai terminaalin varastotankista se muodostaa nestelammikon joka leviää ympäristön vuotopinnalle. RPT-ilmiö tapahtuu vuodon aikana tai sen jälkeen ja sillä voi olla erittäin vakaviakin seurauksia, joskin vaikutusalue on vain vuodon alueella.

LNG-tankkereiden lastisäiliöissä LNG on alhaisessa paineessa ja vuodon tai yhteen törmäyksestä, karilleajosta ym. syntyvän mahdollisen repeämän johdosta RPT-ilmiön tapahtuessa paineenalennusjärjestelmä ei välttämättä kerkeä toimimaan LNG:n äkkiä höyrystyessä suurina määrinä. (Melhem, Saraf & Ozog 2006.)

4.2 Kaasuna

Maakaasun edut polttoaineena ovat huomattavat, koska SO₂- eli rikkidioksidipäästöt ovat lähes olemattomat. Hiilidioksidipäästöt ovat noin 20% ja NO_x- eli typpipäästöt 85% alhaisemmat verrattuna HFO:n ja MDO:n ja täyttävät IMO:n tulevat vaatimukset sellaisenaan.

Rikkidioksidipäästöt muodostavat rikkihappoa, savusumua, pienhiukkasia (*Particulate Matter, PM*) ja aiheuttavat järvien happamoitumista. Typpipäästöt muodostavat voimakkaasti syövyttävää typpihappoa, savusumua, aiheuttavat levänkasvua toimies-

saan lannoitteena, on ihmiselle myrkyllistä ja poistuu hitaasti ilmakehästä. (Tellkamp 2012, 5.)

Jos verrataan maakaasun käyttöä erityisesti HFO:n, tulee vastaan monia laitteiston kannalta helpottavia seikkoja eli monia erilaisia HFO:n käyttöön vaadittuja laitteita ei enää tarvita. Öljymäisen polttoaineen käytön sivutuotteesta, *sludgesta* eli öljylietteestä, huolehtiminen ja siihen liittyvät tankit ja pumput jäävät pois. Tämä öljyliete jää varastotankkien pohjalle tai päästessään polttoaineputkistoon aiheuttaa hankaavien partikkeleiden vaikutuksesta ongelmia separaattorille ja polttoaineruiskuille sekä koneelle ylipäättään.

HFO:n korkean viskositeetin takia sille vaadittuja lämmitysjärjestelmiä ja booster-pumppuja ei tarvita. Eräs merkittävä seikka on myös separaattorien poisjäntti; tosin voiteluöljy ja MDO kuitenkin vaativat edelleen usein separointia. Merkittäviä HFO:n käyttöä hankaloittavia seikkoja ovat aina olleet juuri sen varastointi ja käsittely, epäpuhtaudet ja palamisen laatu. Epäpuhtaudet usein johtavat koneen osien vaurioitumiseen ja korroosioon. (Woodyard 2009, 41-42 & 89.)

Yksi maakaasun turvallisuutta puoltava seikka on sen korkea syttymislämpötila, aikaisemminkin mainittu 600 – 650 °C. Vertailun vuoksi HFO:n syttymislämpötila, vaikkakin vaihtelee paljon laadusta riippuen, on korkeimmillaan n. 170 °C ja matalimmillaan n. 40 °C. Maakaasu voi suurina pitoisuuksina ilmassa syrjäyttää happea ja hengitettynä aiheuttaa huimausta ja pahoinvointia. Hyvä ilmanvaihto on siis tärkeää maakaasua käsitellessä. (Gasum käyttöturvallisuustiedote 2012, 2 & The Engineering Toolbox 2013.)

Maakaasun pääkomponentti metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Vaikka sen määrä on ilmakehässä pienempi kuin hiilidioksidin ja elinikä lyhyempi, sen vaikutukset ilmastoon ovat merkittävät. Metaanin pääsy ilmakehään on siis syytä pyrkiä estämään mahdollimman tehokkaasti ja se on erityisesti otettava huomioon mm. maakaasuputkia suunniteltaessa ja rakennettaessa, jotta vuotoja ei tapahtuisi. (Ilmatieteen laitos 2013.)

5 VARASTOINTI JA LAITTEISTO ALUKSELLA

5.1 Varastointi ja laitteisto

LNG on helposti tankattavaa helposti alhaisen viskositeettinsa ansiosta. LNG-aluksia voidaan bunkrata LNG-säiliörekoista, proomuista tai terminaaleista. LNG:n varastointi aluksella on suunnittelun kannalta haasteellinen tekijä. Varastotankkien koko riippuu siitä, käytetäänkö aluksella sekä MDO:ta että LNG:tä. Tällöin LNG-tankkien koko voi olla pienempi, kun LNG:tä käytetään vain SECA-alueilla ja satamissa. Kun käytetään pelkästään LNG:tä tilaa täytyy olla enemmän.

Erittäin alhaiset lämpötilat tuovat omat vaatimuksensa aluksen putkistoihin. Erikoismateriaalien käyttö on tällaisissa kriittisissä kohdissa välttämätöntä. LNG-tankkien liitännät ja läheiset osat ja alueet pitää olla hyvin lämpöeristetty aluksen teräsrakenteesta. (Tellkamp 2012, 20.)

Eräs tärkeimpiä laitteistoja LNG:ä käyttävässä aluksessa on uudelleenkaasutuslaitteisto, eli kuinka nestemäisessä olomuodossa oleva maakaasu muunnetaan jälleen kaasumaiseen olomuotoon. Yksi kätevä tekniikka on Wärtsilän LNGPac -järjestelmä, uudelleenkaasutuksen hoitava yhtenäinen paketti, joka sisältää bunkrausaseman ja LNG-tankin sekä näihin liittyvät liitännät ja putkistot, glykoli-vesi lämmityspiirin sekä ohjaus- ja valvontajärjestelmän. Järjestelmää saa standardin mukaisena, joissa nettotilavuudet on 95 – 474 m³:n välillä tai tarkalleen asennuksen kohteena olevan aluksen mittoihin suunniteltuna. (Wärtsilä 2014.)

5.2 Jälkiasennus

Useimmat olemassaolevat eri tyyppiset alukset on mahdollista muuttaa jälkiasennuksena LNG-käyttöiseksi. Mietittäessä jo käytössä olevan aluksen muuntamista LNG-käyttöiseksi, on yksi suurimmista haasteista LNG-varastotankkien sijoitus niiden suhteellisen suuren koon takia.

Saksalaiseen matkustaja-autolauttaan M/S Ostfrieslandiin tullaan tekemään myöhemmin vuonna 2014 jälkiasennustyö Wärtsilän toimesta. Aluksen toiminta-alue on Saksan edustalla, jossa sijaitsee myös maailmanperintökohteena oleva kansallispuisto, joten perusteet muutostyölle ovat aiheelliset. Siihen tullaan asentamaan kaksi 6-sylinteristä 20DF –mallin moottoria sekä LNGPac –järjestelmä. Lisäksi aluksessa tullaan käyttämään LNG:n latenttia lämpöenergiaa eli BOG:a ilmastointilaitteistossa, josta seuraa säästöjä energiankulutuksessa jäähdytyskompressoreiden osalta. (Wärtsilä 2013.)

6 KAASUMOOTTORITYYPPEJÄ

6.1 Kaasuottomoottori

Moottorin toiminta perustuu Otto-sykliin. Pääperiaate on, että kaasun ja ilman seos syötetään imukanavaan, se puristuu männän avulla sylinterissä, jonka jälkeen syttyy sytytystulpan kipinällä. Pakoventtiili avautuu ja mäntä työntää palamisessa syntyneet pakokaasut ulos palotilasta ja kierto alkaa uudestaan.

Kaasun painetta ei moottorissa yleisesti tarvitse nostaa kovin korkeaksi, jopa 0,1 baaria voi riittää, koska se syötetään imuilman mukana; vaadittava paine kuitenkin vaihtelee moottorin koon ja tyypin mukaan. Tämänäyttöiset moottorit soveltuu käytettäväksi hyvin CHP- eli kombivoimalaitoksissa. (Huhtinen, Korhonen & Pimiä 2008, 189.)

Yksi huono puoli ottomoottoreissa teollisuus- ja laivakäytössä on, että sytytystulppien kesto tulee vastaan, kun tehoa tarvitsee tuottaa suuria määriä. Vaikkakin ovat teolliseen käyttöön suunniteltuja sytytystulppia, niiden elektrodit kuluvat aina enemmän mitä suuremmat ominaislähtötehot moottori omaa.

Wärtsilän eräs ja suurin tämän moottorityypin moottori 50SG, on laihaseosperiaatteella toimiva, eli polttoaineena toimivaan kaasuun sekoittuu ilmaa ennen

imua ja tämä seos syttyy esikammiossa sytytystulpan avulla puristusvaiheen lopulla. Tämä reaktio sytyttää varsinaisen ilma-kaasu –seoksen sylinterissä ja kierto jatkuu normaalisti. (Wärtsilä 2014.)

Elektronisen sytytyksen sijasta voidaan käyttää pilottipolttoainetta sytyttämään kaasun ja ilman seos juuri männän alkaessa puristaa sitä. Tällä tavalla saadaan paremmat hyötysuhteet sekä vähemmän kulumista. (Woodyard 2009, 56-57.)

6.2 Kaasudieselmoottori

Dieselperiaatteella toimivassa kaasumoottorissa imuilma syötetään imukanavaa pitkin sylinteriin. Männän alkaessa puristaa imuilmaa syötetään kaasu sylinteriin korkeassa, 250 – 450 baarin paineessa ja juuri ennen kaasun syöttämistä ruiskutetaan sylinteriin pieni määrä ns. pilottipolttoainetta joka on yleensä dieseliä. Seos syttyy ja palamisesta syntyneet pakokaasut poistuvat pakovoventtiin avautuessa. Tämän tyyppin moottoreista on myös sovelluksia, joissa voidaan vaihtaa polttoainetta toiminnan aikana Dual Fuel –moottorin tapaan. (Huhtinen ym. 2008, 190-191.)

6.3 Dual Fuel- eli kaksoispolttoainemoottori

Moottorityyppi toimii dieselperiaatteella, mutta eroaa kaasunsyötön osalta kaasudieselmoottorista. Ilma ja kaasu syötetään samaan aikaan sylinteriin, jossa mäntä alkaa puristaa seosta. Puristuessa syötetään pilottipolttoaine ja seos syttyy. Tämän jälkeen avautuu pakovoventtiili ja pakokaasut poistuvat. Pilottipolttoaineena voidaan käyttää kevyttä tai raskasta polttoöljyä tai raakaöljyä.

Dual Fuel –moottorin suurena etuna on mahdollisuus vaihtaa käytön aikana polttoaineesta toiseen, eli kaasukäytöstä dieselkäyttöön sekä niitä voidaan käyttää myös samanaikaisesti. Tämä moottorityyppi on yleisimmin käytetty aluksissa maakaasun yleistettyä ja se antaa hyvin joustavuutta eri polttoaineiden käyttöön riippuen siitä, millä merialueilla milloinkin liikutaan. (Huhtinen ym. 2008, 192-193.)

Mm. Wärtsilä valmistaa Dual Fuel –moottoreita, joita on nykyään malleja 20DF, 34DF ja 50DF; kaikki ovat nelitahtisia. Tehot on valittavissa 0,8 MW ja 17,5 MW väliltä, joten moottoreissa on runsaasti valinnanvaraa aluksen koosta ja tyypistä riippuen. 20DF –mallia on saatavissa 6, 8 ja 9 –sylinterisenä rivimoottorina, 34DF –mallia 6 ja 9 –sylinterisenä rivi- tai 12 ja 16 –sylinterisenä V-moottorina sekä 50DF –mallia 6, 8 ja 9 –sylinterisenä rivi- tai 12, 16 ja 18 –sylinterisenä V-moottorina.

Polttoaineena voidaan käyttää MDO:a, HFO:a tai maakaasua ja käytettävä polttoaine voidaan vaihtaa koneen käydessä noin minuutissa, asteittain korvaten edellistä. Automaatiojärjestelmä huolehtii mm. siitä, että kaasunsyötön mahdollisesti katketessa alkaa samantien polttoöljyn syöttö. Ennen konetta kaasu suodatetaan ja sen painetta säädetään erillisessä kaasuventtiiliyksikössä. Kaasu syötetään konetta pitkin kulkevan common rail –putken avulla jokaiselle sylinterille sylinterikannessa olevien kaasun imuventtiilien kautta. (Wärtsilä 2012.)

Suomessa on tällä hetkellä kaksi LNG-alusta, Viking Linen matkustaja-alus Viking Grace ja Rajavartiolaitoksen ulkovartioalus Turva, joista molemmat käyttävät Dual-Fuel –moottoreita.

7 KAASUTURBIINI

Pääperiaatteeltaan kaasuturbiinissa kompressori tuottaa korkeapaineista ilmaa polttokammioon, jossa polttoaine palaa polttimen avulla. Poltosta syntyneet kuumat kaasut kulkevat varsinaiseen turbiiniosaan, jossa ne laajenevat ja tuottavat hyötytehoa sekä tehoa kaasuturbiinin omaan käyttöön. Varsinaisena hyötytehona turbiinin kehittämästä kokonaistehosta saadaan ulos vain noin kolmasosa. Polttoaineena voidaan käyttää kaasuja: maakaasua, nestekaasua tai biokaasua tai nestemäisiä polttoaineita: lentopetrolia, bensiiniä, dieseliä tai raskasta polttoöljyä.

Yksityiskohtaisemmin kaasuturbiiniprosesseja on avoimia ja suljettuja. Avoimessa prosessissa ilma imetään ulkopuolelta ja palaa pakokaasuina takaisin ulkoilmaan.

Suljetussa prosessissa kaasu kiertää suljetusti koko ajan ja järjestelmään tuodaan lämpöä ulkopuolelta kuumentimella. Kaasuturbiiniprosessin hyötysuhde on yleensä vain n. 36%, mutta sitä voidaan parantaa tuomalla prosessiin erilaisia välivaiheita ja käyttämällä lämmön talteenottokattilaa hyödyntämään pakokaasujen lämpöä. Näin voidaan päästä jopa 60-75 % hyötysuhteisiin. Kaasuturbiineja on yksi- ja moniakselisia. Moniakselisilla saadaan parempi hyötysuhde osakuormilla, koska kompressoria pyörittävän turbiiniosan sijaitessa eri akselilla kuin ns. voimaturbiini, ne eivät ole toistensa nopeuksista riippuvaisia ja ilmamäärää voidaan säätää.

Kaasuturbiinin periaate on keksitty jo 1700-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa on siitä saatu ensimmäisen kerran tehoa irti. Toisen maailmansodan jälkeen sitä on käytetty lentokoneiden, sota-alusten ja voimalaitosten voimanlähteenä. (Huhtinen ym. 2008, 204-226.)

Laivakäyttöön on mm. Rolls Roycella runsas kaasuturbiinivalikoima montaa eri alustyyppiä varten. Eri mallien tehoskaala on 4 MW:sta 40 MW:n ja niitä voidaan soveltaa mm. LNG-tankkereihin, risteilijöihin ja sota-aluksiin. (Rolls Roycen www-sivut 2014.)

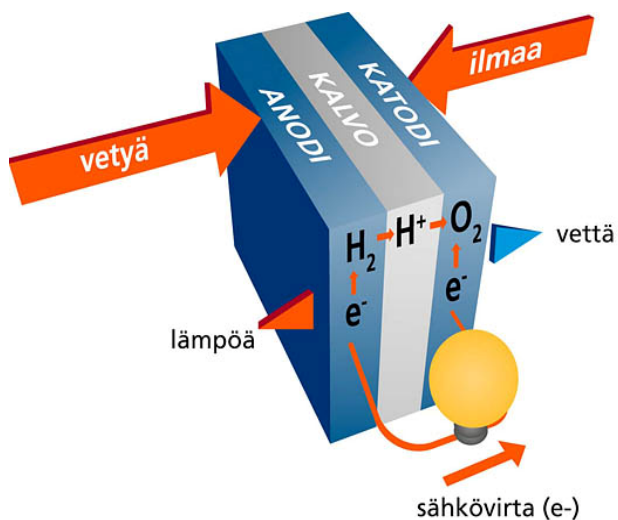
8 POLTTOKENNO

Polttokennon käyttöä merenkulussa on sovellettu Norjalaisessa Viking Lady –aluksessa ennestään siinä olevaan LNG:llä toimivaan kaasusähköiseen propulsioon. Viking Lady on 92,2 metriä pitkä ja 21 metriä leveä, 6100 GT offshore supply –alus joka liikennöi pohjanmerellä. FellowSHIP –projektin lopullisena tavoitteena on korvata polttokennotekniikalla aluksen propulsioon ja sähköntuotantoon liittyvät voimakoneet. Projektiin kuuluvat Norjalainen varustamo Eidesvik, luokituslaitos DNV ja Wärtsilä.

Polttokennon rakenne on samantyylinen kuin akun. Se muuntaa polttoaineen kemiallisen energian suoraan sähköenergiaksi reagoituaan hapen kanssa ja se toimii niin

kauan kuin polttoainetta syötetään. Sähköenergian lisäksi se vapauttaa lämpöenergiaa ja vettä. Polttoaineeksi soveltuu vety, LNG, metanoli tai biokaasu. Polttokennon tyy-
pistä riippuen polttoaine tulee anodille ja sen kanssa reagoiva kaasu, esim. happi, ka-
todille. Niiden välissä on elektrolyyttikalvo.

Kuva 10. Periaatekuva vetyä polttoaineena käyttävästä polttokennosta. (Teknologiateollisuus 2014.)



Koska polttokennon toimintaan ei liity lämpövoimakoneiden maksimihyötysuhteen määräävä Carnot-kierto, sillä saavutetaan huomattavasti parempia hyötysuhteita kuin polttomoottoreilla alhaisissakin lämpötiloissa ja erityisesti vaihtelevilla kuormilla. (FellowSHIP 2012.)

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyötä tehdessä kävi ilmi eri merenkulussa toimivien tahojen suuri kiinnostus vaihtoehtoisia polttoaineita kohtaan. Osaksi tämä on tietenkin pakon sanelemaa kiristyneiden ja edelleen kiristyvien määräysten johdosta, mutta varmasti huomataan, että niille on lopulta aivan järkeviä perusteita ja niiden saavuttamiseksi on ihan asiallista miettiä erilaisia ratkaisuja ja investoida niihin.

Opinnäytetyötä aloittaessa oli suhteellisen hankalaa määritellä käsiteltävän alueen laajuutta, koska aiheeseen liittyviä tärkeitä aihealueita oli paljon ja tuntui ettei paljon kuitenkaan malttanut jättää pois. Alkuperäisestä suunnitelmasta säilyivät tärkeimmät aihealueet lopulliseen versioon, vaikka väistämättä jotain piti karsia. Perehtymis- ja kirjoitusprosessin edetessä sisältö kirkastui ja täsmentyi mielestäni sulavaksi ja järkeväksi ja toivon, että se tuntuu siltä myös lukijasta.

Minulla ei aloittaessa ollut käytännön kokemusta maakaasusta eikä LNG:stä, joten lähdin avoimin mielin perehtymään aiheeseen ja hankkimaan siitä tietoa. Pyrin säilyttämään objektiivisen näkökulman ja mielestäni onnistuin tässä.

Huomattavan paljon on erilaisia ratkaisuja tarjolla ja uusia kehitellään koko ajan, jotta saadaan parempia hyötyjä irti pakollisista määräysten mukanaan tuomien ympäristön kannalta hyödyllisten parannusten lisäksi. Erityisen kiinnostavaa on tulevaisuudessa mm. nähdä, miten FLNG-tekniikkaa tullaan käyttämään ja tuleeko se yleistymään, kun Shellin Preludesta saadaan käyttökokemuksia.

Biokaasun rooli tulevaisuudessa tulee olemaan myös merkittävä ja uusiutuvana energialähteenä se tulee oletettavasti jossain vaiheessa korvaamaan maakaasun käyttöä. Nämä vaihtoehdot eivät kuitenkaan sulje toisiaan kokonaan pois, koska pitkälle samaa tekniikkaa voidaan käyttää molempien kaasujen prosessoinnissa, siirrossa ja käytössä.

LÄHTEET

- Suomen varustamot. 2011. Merenkulun rikkipäästöt. Viitattu 10.12.2013.
<http://www.shipowners.fi/fi/ymparisto/ilmansuojelu%20ja%20ilmastonmuutos/merenkulun%20rikkipaastot>
- BP. 2012. Natural gas trade movements. Viitattu 31.12.2013.
<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013/review-by-energy-type/natural-gas/natural-gas-trade-movements.html>
- Maakaasukäsikirja. 2010. Suomen kaasuyhdistys. Viitattu 18.11.2013.
http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/kasikirja/kasikirja_20110307.pdf
- Klemola, K. 2013. Maakaasu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 28.11.2013. <http://www3.lut.fi/webhotel/teke/ktp/2012/5.1.2-maakaasu.pdf>
- The Engineering Toolbox. Fuels – Densities and Specific Volumes. Viitattu 3.12.2013. http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-densities-specific-volumes-d_166.html
- AGA. 2012. Palavat kaasut. Viitattu 15.12.2013.
http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/nav_flamm_gas
- Gasum. 2013. Mitä biokaasu on? Viitattu 28.11.2013.
<http://www.gasum.fi/tuotteet/biokaasu/Sivut/Mitabiokaasuon.aspx>
- Gasum. 2013. Usein kysyttyä. Viitattu 13.12.2013.
<https://www.gasum.fi/yritysinfo/useinkysyttya/Sivut/default.aspx>
- AGA. 2012. Nestekaasu. Viitattu 10.12.2013.
<http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/propane>
- World LP Gas Association. About LP Gas. Viitattu 11.12.2013.
<http://www.worldlpgas.com/about-lp-gas>
- Neptune Gas Technologies LTD. 2013. Marine CNG. Viitattu 4.1.2014.
http://www.neptunegas.ca/marine_cng/index.html
- AGA. 2012. Maakaasua saatavilla enemmän kuin öljyä. Viitattu 4.12.2013.
http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/docbyalias/lng_supply_chain
- Gasum. 2013. Puhtaasti palava luonnonkaasu. Viitattu 3.12.2013.
<http://www.gasum.fi/tuotteet/maakaasu/Sivut/default.aspx>
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2013. Maakaasumarkkinat. Viitattu 3.12.2013.
<http://www.tem.fi/energia/maakaasumarkkinat>

- 2b1st Consulting www-sivut. 2012. Viitattu 1.12.2013.
<http://www.2b1stconsulting.com/liquefaction/>
- Air Products. 2013. Air Products' AP-SMR and AP-C3MR LNG processes. Viitattu 26.12.2013. <http://www.airproducts.com/~media/Files/PDF/industries/lng/lng-air-products-ap-smr-and-ap-c3mr-lng-processes.pdf>
- Mitsubishi Heavy Industries. 2010. Viitattu 17.12.2013.
http://www.mhicompressor.com/en/business/compressor/compressor_07.html
- Offshore Technology. 2013. Viitattu 17.12.2013. <http://www.offshore-technology.com/features/feature1518/feature1518-3.html>
- Hydrocarbons Technology. 2012. Viitattu 16.12.2013. <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/sakhalin2/sakhalin24.html>
- Oil & Gas Journal. 2002. Viitattu 30.1.2014.
<http://www.ogj.com/articles/print/volume-100/issue-27/processing/double-mixed-refrigerant-lng-process-provides-viable-alternative-for-tropical-conditions.html>
- Linde Engineering. 2013. Viitattu 16.12.2013. http://www.linde-engineering.com/en/process_plants/liquefied_natural_gas/small_to_midscale_lng_plants/index.html
- Höegh LNG. 2013. Why floating LNG production? Viitattu 21.12.2013.
<http://www.hoeghlng.com/flng/Pages/Why-Floating-LNG-Production.aspx>
- Shellin www-sivut. 2013. Viitattu 20.12.2013. www.shell.com
- Interesting Engineering. 2013. Prelude FLNG: Largest ship hull in the world. Viitattu 4.1.2014. <http://interestingengineering.com/worlds-largest-ship-hull-to-be-created/>
- Elengy. What is a LNG terminal? Viitattu 17.12.2013.
<http://www.elengy.com/en/about-elengy/activities/what-is-an-lng-terminal.html>
- Gasum. 2014. Porvoon tuotantolaitos. Viitattu 27.1.2014.
<http://www.gasum.fi/Kaasutietoutta/Nesteytetty-maakaasu-LNG/Tuotantolaitokset/>
- Gasum. 2013. Pansion LNG-terminaali. Viitattu 16.12.2013.
<http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/pansionlng/Sivut/default.aspx>
- Gasum. 2013. Balticconnector yhdistää kaasuverkostot. Viitattu 16.12.2013.
<http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/balticconnector/Sivut/default.aspx>
- Gasum. 2013. Finngulf LNG. Viitattu 16.12.2013.
<http://www.gasum.fi/kaasuverkostot/finngulfng/Sivut/default.aspx>
- Alhosalo, M. 2013. LNG-ratkaisuun satsattava Satakunnassa. Satakunnan Kansa 28.10.2013, 28

- Carbon Sciences. 2008. Making Transportation Fuels from Natural Gas. Viitattu 29.1.2014. http://www.carbonsciences.com/market_potential.html
- Natgas.info. Gas to Liquids – GTL. Viitattu 29.1.2014. <http://www.natgas.info/gas-information/what-is-natural-gas/gtl>
- The Engineering Toolbox. Flash Point – Fuels. Viitattu 17.12.2013. http://www.engineeringtoolbox.com/flash-point-fuels-d_937.html
- Bright Hub Engineering. 2011. Modern Electrical Propulsion System for LNG Tankers. Viitattu 17.1.2014. <http://www.brighthubengineering.com/marine-engines-machinery/121954-modern-electrical-propulsion-system-for-lng-tankers>
- Woodyard, D. 2009. Pounder’s Marine Diesel Engines and Gas Turbines. 9. uud. p. Great Britain: Elsevier.
- Käyttöturvallisuustiedote: LNG nesteytetty maakaasu. 2012. Gasum. Viitattu 3.1.2014. <http://www.gasum.fi/tuotteet/lng/Documents/LNG%20Nesteytetty%20maakaasu.pdf>
- Melhem, G.A., Saraf, S., Ozog, H. 2006. Understand LNG RPT. Viitattu 9.2.2014. http://www.iomosaic.com/docs/training/Understand_LNG_RPT.pdf
- Ilmatieteen laitos. 2013. Metaanin vapautuminen ilmakehään suuri huoli. Viitattu 17.12.2013. <http://ilmatieteenlaitos.fi/ajankohtaista/1229894>
- Wärtsilä. 2014. Wärtsilä LNGPac. Viitattu 20.2.2014. <http://www.wartsila.com/en/gas-systems/LNG-handling/LNGPac>
- Wärtsilä. 2013. Viitattu 26.2.2014. <http://www.wartsila.com/en/press-releases/wartsila-retrofits-german-ferry-with-dual-fuel-engines-to-reduce-environmental-footprint-on-sensitive-sea-area>
- Tellkamp, J. 2012. LNG as a marine fuel. Det Norske Veritas AS. Viitattu 3.1.2014. http://www.dnv.de/Binaries/DNV_Presentation_LNG_Nautischer_Verein_Brunsb%C3%BCttel_20120206_tcm70-509814.pdf
- Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Keuruu: Otava.
- Wärtsilä. 2012. Wärtsilä Engines. Viitattu 25.1.2014. <http://www.wartsila.com/file/Wartsila/en/1278529609351a1267106724867-Wartsila-O-E-W-DF.pdf>
- Wärtsilä. 2014. Wärtsilä gas-fired engines. Viitattu 25.2.2014. <http://www.wartsila.com/en/power-plants/technology/combustion-engines/gas-engines>
- Rolls Roycen www-sivut. 2014. Viitattu 2.3.2014. <http://www.rolls-royce.com>

-FellowSHIP. 2012. Facts about FellowSHIP and the Viking Lady. Viitattu 23.12.2013. <http://vikinglady.no/wp-content/uploads/2009/12/Facts-FellowSHIP-and-Viking-Lady2.pdf>

- Teknologiateollisuus. 2014. Polttokennot. Viitattu 26.2.2014. <http://www.teknologiateollisuus.fi/fi/palvelut/polttokennot-3027.html>