

Nesteytettyä maakaasua käyttävän meriliikenteen kasvihuonekaasujen päästö- lähteitä



Pekka Räisänen, Marko Piispa & Mikko Nykänen

Nesteytettyä maakaasua käyttävän meriliikenteen kasvihuonekaasujen päästölähteitä



**Turun ammattikorkeakoulun
raportteja 234**

Turun ammattikorkeakoulu
Turku 2016

ISBN 978-952-216-642-5 (pdf)
ISSN 1459-7764 (elektroninen)

Jakelu: <http://loki.turkuamk.fi>

Sisältö

Tiivistelmä	4
Summary	5
1 Johdanto	6
2 Kaasun tuotanto- ja kuljetusketjun päästöt	7
3 Päästöt tankkauksen yhteydessä	8
4 Päästöt onnettomuuksissa	10
5 Metaanipäästöt laivamoottoreissa	13
6 LNG-tankkauksen päästöjen mittaus	18
7 Johtopäätökset	24
Lähteet	25

LYHENTEET

ECA	Emission Control Area (IMO:n termi, päästönrajoitusalueet merillä)
FID	Flame Ionisation Detector (liekki-ionisaatioon perustuva mittaustekniikka)
FTIR	Fourier Transform Infrared (Fourier-muunnokseen perustuva infrapuna-tekniikka)
HFO	Heavy Fuel Oil (raskas polttoöljy)
IMO	International Maritime Organization (Maailman merenkulkujärjestö)
IR	Infrared (infrapunatekniikka)
LNG	Liquefied Natural Gas (nesteytetty maakaasu)
MDO	Marine Diesel Oil (dieselöljy)
NOx	Typpioksidit
SOx	Rikin oksidit

Tiivistelmä

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tarkastellaan lyhyesti päästöjä nesteytetyn maakaasun tuotannon, kuljetusten, tankkauksen ja onnettomuuksien yhteydessä sekä laivamoottorien päästöjä ja niiden mittausta. Päästölaskennassa on otettu oletukseksi, että maakaasun metaanin kasvihuoneilmiötä lisäävä vaikutus on sadan vuoden aikavälillä 20–25 kertaa suurempi kuin vastaavan metaanimäärän poltossa syntyvän hiilidioksidin. Kasvihuonekaasujen päästöt maakaasun tuotannossa ja siirrossa koostuvatkin pääosin hiilivetyjen (lähinnä metaanin) joutumisesta ilmakehään sekä kaasun polton aiheuttamasta hiilidioksidipäästöstä. Suomen olosuhteissa tuotannon ja kuljetuksen metaanipäästöjen on laskettu olevan suuruusluokkaa 10–20 % kaasun koko hiiliekvivalentista. Muita päästölähteitä ovat tankkaus, onnettomuudet ja moottorit.

Onnettomuusskenaarioiden avulla saadaan arvioitua suurien vuotojen todennäköisiä päästöjä, esimerkiksi tankkiautokuljetus 40 m³ LNG:tä ja laivasta laivaan siirto 300–2400 m³. Tankkerionnettomuuden yhteydessä ilmakehään pääsevän kaasun määrää on simuloitu numeerisin menetelmin ja on arvioitu, että noin 60 % tankin tilavuudesta voi purkautua ilmakehään. Yhden tankin vauriona tämä voi tarkoittaa jopa 30.000 m³:n (noin 13.000 tonnin) päästöä suurimmilla laivoilla.

Maakaasun polttaminen aiheuttaa noin 170–200 g/kWh vähemmän hiilidioksidia kuin raskaan polttoöljyn käyttö. Mikäli paloprosessissa syntyy metaanipäästöjä, etu pienenee. Moottoritekniikalla on suuri merkitys palamattoman metaanin määrään.

Satamien ja LNG:llä operoivien varustamoiden kannalta maakaasun käytön turvallisuudesta huolehtiminen minimoi hyvin myös kaasun tahattomat päästöt ympäristöön. Suuren yksittäisen onnettomuuspäästön merkitys ympäristölle lienee suhteellisen pieni normaalin käytön hiilidioksidipäästöihin verrattuna, koska suuret päästöt ovat harvinaisia.

Koko kuljetusketjun kannalta päästöjen minimoinnissa on tärkeä keskittyä kaasun tuotannon, kuljetusten ja käytön aikaisiin päästöihin, joihin parhaat vaikutusmahdollisuudet ovat energian toimittajilla ja moottorinvalmistajilla. Polttoaineiden vertailuissa tulee ottaa huomioon kasvihuonekaasujen lisäksi myös typpi- rikki- ja partikkelipäästöt.

Summary

The literature on emissions during production and transport of liquefied natural gas, as well as in connection with accidents and refuelling the ship engine emissions and their measurement were reviewed. Generally it is assumed that unburned methane causes 20 to 25 times higher emissions than carbon dioxide from the combustion. Greenhouse gas emissions from the production and transport of natural gas consist mainly of hydrocarbons (mainly methane). For Finland, their effect was calculated to be of the order of 10–20% of total emission. Other emission sources are fuelling, accidents and motors.

From accident scenarios it can be estimated that typically 40 m³ of LNG can escape from lorry transport, and 300–2,400 m³ from ship to ship transfer, respectively. For LNG tanker ships, it can be estimated that in the order of 60% of the volume of the tank may be discharged into the atmosphere. This can mean up to 30,000 m³ (about 13,000 tonnes) release from the largest ships.

About 170–200 g / kWh less carbon dioxide is released to the atmosphere in combustion compared to the use of heavy fuel oil. If the combustion process generates methane emissions, the benefit is reduced. Engine technology is of great importance in reducing the amount of unburned methane.

To avoid the hazards caused to humans by LNG emissions, ports and shipping companies strive to minimize accidental releases, and this also protects the environment. The environmental effects of large accidental releases are probably relatively small compared to carbon dioxide emissions from normal operation, because large emissions are rare.

Minimizing emissions is an important task in gas production, transportation and use. The most influential actors are the energy suppliers and engine manufacturers. In fuel comparisons, nitrogen, sulphur and particulate emissions should be taken into consideration, in addition to greenhouse gas emissions.

1 Johdanto

Nesteytetyn maakaasun eli LNG:n käyttö yleistyy meriliikenteessä, ja siitä syntyvien kasvihuonekaasujen merkitys kasvaa. Vuonna 2014 LNG-laivoja maailmassa oli käytössä luokituslaitos DNVGL:n mukaan yhteensä 50. Rakenteilla on noin 70 LNG-käyttöistä alusta. Maakaasu nähdään ilmastoystävällisenä vaihtoehtona, koska se tuottaa poltettaessa pienemmät hiilidioksidipäästöt kuin vastaavat öljytuotteet. Merikuljetuksiin vaikuttavia päästövaatimuksia on paitsi kasvihuonekaasuille, myös rikki- (SOX, ECA- merialueet), typpi- (NOX, Tier III) ja partikkelipäästöille. Nämä vaikuttavat moottorivalintaan. (Ott, 2014b, 2), (Hagedorn 2014).

Maakaasun aiheuttamien räjähdys-, palo-, syväjäähdytys- ja tukahduttamisriskien takia sen kuljetusta ja käyttöä säädelään monin tavoin. Merikuljetusten ja käytön osalta alan toimijat ovat listanneet yhteensä 83 LNG:llä toimivia aluksia koskevaa sääntöä (LNG Ship Fuel Safety Advisory Group. 2013). Turvallisuusasiat ovat niissä korostuneesti esillä.

Grahn ym. (2013) ovat tutkineet LNG:n ja muiden polttoaineiden käyttöön vaikuttavia taloudellisia tekijöitä. Heidän ennusteensa mukaan lähivuosikymmeninä öljyn käytön vähentäminen merikuljetuksissa tulee olemaan kustannuksiltaan edullista. Korvaavina polttoaineina ovat todennäköisesti metanoli ja LNG; bioenergian osuus merikuljetuksissa ennustetaan pieneksi. Kehitystä ovat ajaneet myös eri polttoaineiden suhteellisten hintojen muutokset. Esimerkiksi raskaan polttoöljyn ja dieselöljyn maailmanmarkkinahinnat kolminkertaistuivat viimeisen kymmenen vuoden sisällä, mutta LNG:n hinta on voinut vaihdella paikallisesti, saatavuudesta riippuen (Ott, M. 2014b, 4)

LNG, joka on pääosin metaania (96–98 %), on hiilidioksidia paljon vahvempi kasvihuonekaasu. Metaani hajoaa ajan myötä UV-säteilyn vaikutuksesta hiilidioksidiksi. Metaanin tiedetään hajoavan ilmakeässä noin 10 vuodessa, mutta metaanin ilmakehää lämmittävä vaikutus on jopa 25 kertaa suurempi kuin hiilidioksidin. Suurin osa metaanista hajoaa vasta korkealla ilmakehässä.

Tässä yhteenvedossa tarkastellaan kirjallisuuden perusteella lyhyesti kaasupäästöjä kaasun tuotannon, kuljetuksen, tankkauksen ja onnettomuuksien yhteydessä sekä laivamoottorien päästöjä ja niiden mittausta.

2 Kaasun tuotanto- ja kuljetusketjun päästöt

Kasvihuonekaasujen päästöt maakaasun tuotannossa ja siirrossa koostuvat pääosin hiilivetyjen (lähinnä metaanin) joutumisesta ilmakehään sekä prosesseissa tapahtuvan kaasun polton aiheuttamasta hiilidioksidipäästöstä. Määrä riippuu kaasun määrästä ja laadusta, prosessien termisestä tehokkuudesta sekä höyrystyneen maakaasun käsittelymenetelmistä.

Päästöt voidaan jakaa tahallisiin ja tahattomiin. Tahalliset päästöt syntyvät systeemien ominaisuuksista huoltojen ja käytön aikana, ja niissä hiilivedyt voidaan johtaa ilmakehään polttamattomina (esim. pneumaattiset venttiilit, laitteiden tyhjenys kaasusta huoltoa varten) tai polttaa. Tahattomia päästöjä syntyy esimerkiksi vuodoista laitteistoissa, kuten pumpuissa, kompressoreissa, putkilinjoissa, putki- ja letkuliitoksissa. Herkellisiä päästöjä syntyy esimerkiksi tankkaustilanteessa laippojen ja yhteiden vuotojen, lämpötilamuutosten, ylipaineventtiilien vuotojen ja odoteluajan höyrystymisen takia (American Petroleum Institute 2015, Robinson 2006).

Maitse Suomeen tapahtuvan kuljetusketjun ja maakaasun polton päästöjä on käsitelty kirjallisuudessa (Ruonakoski 2011, Gasum 2013, 31, NesteJacobs 2014). Julkaisuissa esitetyt laskentaperusteet vaihtelevat jonkin verran. NesteJacobsin (2014, 11) mukaan Suomeen Venäjältä tuodun maakaasun suorat hiilivetyjen (lähinnä metaanin) ja kaasun hiilidioksidin ekvivalentit hiilidioksidipäästöjä per kaasun energiamäärä ovat noin 2,8 g/MJ vuodessa. Tämän lisäksi kaasun tuotannossa ja siirrossa syntyy päästöjä, ja yhteensä ekvivalentti päästö on NesteJacobsin (2014, 11) mukaan 13,3 g/MJ. Tätä voidaan verrata kaasun käytön polttoprosessissa syntyvään hiilidioksidin määrään, joka on täydellisessä palamisessa noin 55,0 g/MJ. Yhteensä päästöt ovat NesteJacobsin arvion mukaan noin 68 g/MJ (karanneiden hiilivetyjen, siirron ja tuotannon osuus olisi siis noin 19 % kokonaispäästöstä). Ruonakoski (2011) laski kirjallisuuteen perustuen yhdistetyksi päästökseksi noin 64 g/MJ, ja kaasun tuotannon ja Venäjällä tapahtuvan siirron osuuden kokonaispäästöistä noin 13 %:ksi olettaen, että käytössä maakaasu poltetaan täydellisesti hiilidioksidiksi. Arvioitaessa energian käytön kokonaispäästöjä on oleellista ottaa huomioon, miten tarkasti loppukäyttäjän polttoprosessi pystyy polttamaan hiilivedyt.

3 Päästöt tankkauksen yhteydessä

Maakaasun palamisen, räjähdysen ja hapen syrjäyttämisen ihmisille aiheuttamat vaarat tunnetaan hyvin. Tankkauksen yhteydessä näiden ehkäisystä huolehditaan tarkasti esimerkiksi inertoimalla, tuuletuksella ja automaattisilla bunkrausputkien turvalaitteilla (Liikenne- ja viestintäministeriö 2012). Vaarallisten aineiden kuljetus rekoilla kaupunkien keskustoihin on ongelma, ja usein laivasta laivaan -tankkaus on helpompi toteuttaa. Vaarat syntyvät kaasupäästöistä, joten hyvä ihmisten suojele ehkäisee myös ympäristöpäästöjä.

Maakaasun käsittelyssä tarvittavien laitteiden ja niiden osien kautta tapahtuvia päästöjä ilmakehään on kartoitettu (API 2015, 32) ja pääkomponenteille on määritetty todennäköisyydet vuodon määrälle. Kun nämä tunnetaan, voidaan systeemin todennäköistä päästöä arvioida laskemalla komponenttien määrät järjestelmässä, ja laskemalla näiden todennäköiset päästöt yhteen. Arviointitapa sopii suurille maakaasun käsittelyjärjestelmille, joiden komponenttien määrä on suuri.

Samalla tavoin voidaan meriliikenteessä tapahtuvia todennäköisiä vuodon määriä arvioida komponenttien, tankkauskertojen määrän ja keston avulla (Holden, D. ym. 2014, 53–59). Esimerkiksi kerran vuorokaudessa tapahtuva tunnin pituinen yhteiden vuoto tankkauksessa tarkoittaisi vuodessa $365 \times 1\text{h} \times 0,16 \text{ m}^3/\text{h} = 58 \text{ m}^3$ (NTP, tiheys $0,72 \text{ kg}/\text{m}^3$) vuotoa, eli noin tonnin hiilidioksidipäästöä vastaavaa määrää.

Pienten järjestelmien, kuten laivojen tankkauslaitteistojen, toimintaa ja vuotoja pystytään tutkimaan myös komponentti kerrallaan. Tällöin kunkin komponentin todellisia päästöjä voidaan tarvittaessa seurata toiminnan aikana sekä huolloissa.

TAULUKKO 1.

Oletusarvoja vuotavien laitteiden hiilivetyjen päästökertoimille kaasujärjestelmissä (API 2015, U.S. EPA 2011) likimäärin kuutiometreinä normaalipaineessa.

Kompressorin komponentit	m³/h
Venttiili	0,42
Yhteet (laipat ja kierreliittimet)	0,16
Purkausputket	0,49
Ylipaineventtiili	1,12
Mittari	0,55
Muut komponentit	m³/h
Venttiili	0,18
Yhteet (laipat ja kierreliittimet)	0,16
Purkausputket	0,32
Ylipaineventtiili	0,06
Mittari	0,08
Keräilyputkisto (m ³ /h/km)	0,05

4 Päästöt onnettomuuksissa

NesteJacobsin (2014, 12) mukaan maakaasuverkon kuljetuspäästöt Suomessa vastaavat noin 26000 tonnin ekvivalenttia hiilidioksidipäästöä vuodessa. Tätä voidaan verrata mahdollisissa onnettomuuksissa tapahtuviin ekvivalentteihin hiilidioksidipäästöihin. Palamattomana vapautuvan maakaasun määrä on kasvihuonekaasujen kannalta pahempi tilanne kuin vastaavan päästön palaminen onnettomuuden yhteydessä. Käyttämällä kerrointa 25 metaanipäästöille verrattuna polttoon hiilidioksidiksi voidaan arvioida, että noin tuhannen tonnin LNG-päästö palamattomana ympäristöön vastaa Suomen alueen vuosittaisia maakaasun siirrosta johtuvia CO₂-päästöjä. (1000 tonnia á 0,45 t/m³ eli noin 2200 m³ nestemäistä LNG:tä). Tämän suuruisia päästöjä voi syntyä esimerkiksi kaasun varastoinnin ja laivakuljetusten yhteydessä.

Höyrystymisen jälkeen maakaasu on kylmää, ja noin 1,4 kertaa painavampaa kuin ilma. Kun kaasu lämpenee, sen tiheys pienenee niin, että -120 °C:ssa se on ilman tiheyden suuruinen, ja 15 °C:ssa 0,55 % ilman tiheydestä. LNG-vuodon sattuessa syttymätön kaasu on useimmiten havaittavissa ilman kosteuden tiivistyessä sen lähistöllä. (Liquefiedgascarrier.com, 2016). Ilmaston lämpenemisen kannalta lienee parempi lopputulos se, että kaasu syttyy vuodon jälkeen tuleen. Tämä on todennäköistä, sillä syttymislähteitä on havaittu useimmissa tutkituista onnettomuuksista (Hightower ym. 2004, 45, 46, 51, 52, Woodward & Pitbaldo 2010).

Onnettomuusskenaarioiden avulla saadaan arvioitua suurien vuotojen todennäköisiä päästöjä (Holden ym. 2014). Tyypillisesti tankkauksessa vuotoja aiheuttavat jakotukkiin kytkennän häiriöt, letkujen ja putkien vikaantumiset sekä tankkeihin kohdistuvat onnettomuudet. Muita tyypillisiä ulkoisia tekijöitä ovat inhimillinen virhe laitteiston käytössä, materiaalien väsyminen lämpötilavaihtelujen takia, laivan kiinnitysjärjestelmän häiriö, toisen aluksen aiheuttama isku ja äärimmäiset sääolosuhteet. Päästölähteiden lisäksi voidaan tutkia vuodon havaitsemiseen ja tukkimiin kuluva aikaa ja arvioida vuodon todennäköistä suuruutta. Tyypillinen aika päästölähteen eristämiseen on muutamia minutteja edellyttäen, että paikalla on toimintakykyistä henkilökuntaa. Holden ym. (2014, 53) ovat tehneet onnettomuus-simulaatioiden yhteydessä arvioita tankkauksiin liittyvistä kaasutilavuuksista ja pää-

tyneet seuraaviin tilavuuksiin: tankkiautokuljetus 40 m³ LNG:tä, maista otto 500 m³, ja laivasta laivaan siirto 300–2400 m³. Voidaan päätellä, että nämä arvot sopivat myös metaanipäästön maksimisuuruuden arviointiin eri tankkausmuodoissa.

Yksi potentiaalinen suurien LNG-päästöjen lähde on LNG-tankkialus. Suuren laivakuljetuspäästön yhteydessä ilmakehään pääsevän kaasun määrää on simuloitu numeerisin menetelmin, tosin skenaarioista on useita mielipiteitä (Baik ym. 2006). Näiden perusteella on arvioitu, että suuruusluokkaa 60 % tankin tilavuudesta voi purkautua ilmakehään. (Hightower ym. 2013, U.S. Department of Energy 2012). Yhden tankin vauriona tämä voi tarkoittaa jopa 30.000 m³:n (noin 13.000 tonnin) päästöä suurimmilla laivoilla (Luketa ym. 2014). LNG:n kuljetuksiin kohdistuvat onnettomuudet on kirjallisuudessa jaettu kahdeksaan pääkategoriaan (Holden, D. ym. 2014. International Maritime Organization, 2007, Parfomak. 2008, s. CRS-8 ja Vanem ym., 2007):

1. Yhteentörmäys toisen aluksen kanssa
2. Karilleajo
3. Törmäys esteeseen
4. Palo tai räjähdys
5. Aluksen laitevika
6. Huono sää
7. Ongelmatilanne lastauksen tai purkamisen yhteydessä
8. Lastitilan ja lastilaitteiden vauriot.

Kylmän LNG:n valuessa nesteenä ulos tankkiin tulleen reiän kautta syntyy lammikko, jossa neste höyrystyy kaasuksi. Kylmä neste haurastuttaa teräsrakenteita, mikä voi johtaa lisävuotoihin (Quillen 2012). Mikäli 5–15 % kaasu/ilmaseos kohtaa syttymislähteen, tapahtuu syttyminen. Maailman merenkulkujärjestön analyysin mukaan (IMO 2007, 49) näistä yhteentörmäys, karilleajot ja törmäykset aiheuttavat suurimman riskin ihmisille suuren kaasuvuodon mahdollisuuden takia. Johtopäätös voitaneen ulottaa myös ympäristöriskeihin.

Pääuhkat ovat IMO:n (2007, 8) mukaan:

1. Kaasuuntuvan nestelammikon tulipalo
2. Syttymättömän kaasupilven eteneminen ja syttyminen
3. Hyvin alhaisen lämpötilan aiheuttamat vahingot
4. Vuodon lähistöllä oleskelevien henkilöiden tukehtuminen hapen syrjäytymisen takia
5. Nestelastin kerrostumisesta johtuva äkillinen kaasuuntuminen säiliössä (Rollover)
6. Räjähdysmäinen muutos nesteestä kaasuksi (Rapid Phase Transition, RPT)
7. Kaasun räjähdys

Yleisesti ottaen LNG:n merikuljetusten onnettomuustiheys on alhainen verrattuna muihin merikuljetuksiin (mm. Curt 2004). Lisäksi arvioitu, että kaasun vuotaminen ulos suuresta LNG-tankkerista onnettomuustapauksissa on epätodennäköistä (Hightower ym. 2004, 45; Woodward & Pitbaldo 2010, 32) sillä tankit ovat hyvin runkorakenteiden suojassa, turvaetäisyyden päässä laidoituksesta.

5 Metaanipäästöt laivamoottoreissa

Kiristyneet typen, rikin pienhiukkasten ja kasviuonekaasujen päästörajat laivamoottoreissa muuttavat varustamoiden toimintaa. Tapoja päästöjen pienentämiseen etsitään aktiivisesti. Polttoaineen rikkipitoisuuden pienentäminen on helppo keino täyttää rikkipäästörajat. Vähärikkisen polttoaineen hinnan ennustetaan nousevan verrattuna muihin laatuihin (Pospiescl 2014). Pesuriteknologian kehittäminen tarjoaa varustamoille toisen tavan hallita päästöjään. Tällöin korkearikkiset pakokaasut pestään ja syntynyt jäte lasketaan mereen tai viedään maihin loppukäsiteltäväksi. Nesteytetyn maakaasun (LNG) käyttö laivamoottoreissa on kolmas tapa, sillä rikin määrä polttoaineena käytettävässä maakaasussa on pieni ja päästörajat alitetaan helposti.

Verrattuna raskaaseen polttoöljyyn, maakaasun päästöt moottoreissa ovat 100 % pienemmät rikin oksideissa, 20–30 % pienemmät hiilidioksidissa ja pienhiukkasissa 90–100 %. Matalapaineisissa ottomoottoreissa typpioksidien päästöt ovat 85 % pienemmät kuin raskasöljydieseleissä ja korkeapaineisissa kaasudieselmoottoreissa noin 40 % pienemmät. Viimemainituissa tarvitaan pakokaasujen uudelleen kierrätystä (EGR, Exhaust Gas Recirculation) tai katalyyttistä puhdistusta (SCR, Selective Catalytic Reduction) päästörajojen saavuttamiseen (European Union 2015). Suuren ilma-polttoainesuhteen (lean burn) tuottama alhainen lämpötila ja tasainen paine sylintereissä (Wärtsilä 2015) johtavat alhaisiin typen oksidien päästöihin, jotka alittavat selvästi IMO:n nykyiset rajat. Kaasu sisältää vain vähän rikkiä, ja rikin oksidien päästöt ovat siten hyvin pieniä, ja ne alittavat tulevatkin päästörajat selvästi. Myös partikkelipäästöt ovat kaasukäytössä pieniä, 95–100 % pienemmät kuin raskaalla polttoöljyllä (Einang 2011b, European Union 2015, Hagedorn 2014, Ott, 2014b)

Kustannusten kannalta parhaan ratkaisun löytäminen on merenkululle tärkeää. Päästörajoitusalueiden (Emission Control Areas, ECA) määrä ja niiden valvonta tulee lisääntymään. Sallittu rikin määrä polttoaineessa tulee vähenemään 1 %:sta 0,1 %:iin. On arvioitu (Pospiescl 2014), että 80–90 % kaikista laivoista tulee käymään päästörajoitusalueella (Emission Control Area, ECA) elinaikanaan. Typpi-päästöjen vähentäminen suuntautuu lähinnä uudisrakennuslaivoihin (Ott, 2014b).

Sisävesialusten säännöstö tunnetaan nimellä CCR4 (Central Commission of the Navigation of the Rhine). Siinä määrätään rikin ja typen oksidien sekä partikkelien päästöistä. (Tanker Shipping & Trade, 2012.) Erään arvion mukaan päästörajoi-
tukset vaikuttavat noin 12000 sisävesialukseen seuraavien kymmenen - viidentoista
vuoden aikana. (Kruyt 2012).

5.1 Metaanipäästöt “Methane slip”

Kuten edellä on jo todettu, päästölaskennassa on otettu yleisesti oletukseksi, että metaanin kasvihuoneilmiötä lisäävä vaikutus on sadan vuoden aikavälillä 20–25 kertaa suurempi kuin vastaavan metaanimäärän poltossa syntyvän hiilidioksidin (Pospiecl 2014, Tyler 2011, Einang 2011a, Einang 2011b). Metaanilla on siis voimakas kasvihuonevaikutus, jonka takia moottorissa palamatta jäävät kaasut voivat olla ongelma. Maakaasua voidaan käyttää laivamoottorien polttoaineena kahdella eri tavalla: dieselprosessissa, jolloin paloilma puristetaan ennen polttoaineen ruiskutusta tai otto-prosessissa, jossa ilma ja kaasu puristetaan yhdessä ennen sytytystä. Kaasun palaminen otto-prosessilla kaasumoottoreissa ja kaksoispolttoaineella varustetussa moottoreissa tapahtuu verrattain alhaisessa lämpötilassa ja paikallisesti palaminen saattaa olla epätäydellistä, jolloin maakaasun metaania päätyy ilmakehään. Korkeapaineisessa ja kuumemmassa dieselprosessissa kaasun palaminen on tämänhetkisel-
lä teknologialla lähes täydellistä. Tämä ei kuitenkaan ole itsestään selvä kehityssuunta moottoritekniikassa, sillä päästöongelma muuttuu diesel-prosessissa – muun muassa typen oksidien ja pienhiukkasten päästöt suurenevat, ja näiden päästöjen vähentäminen vaatii lisäratkaisuja.

Metaanin palaminen moottorissa edellyttää vähintään 540 °C:n lämpötilaa, raskaammat hiilivedyt palavat alemmissa lämpötiloissa. Metaanipäästöt moottoreissa johtuvat kaasujäämistä palotilan onteloissa, imu- ja pakokanavissa, sekä epätäydellisestä palamisesta (Contessi 2013). Maakaasun vähäisemmästä hiilimäärästä johtuen sen polttaminen aiheuttaa noin 170–200 g/kWh vähemmän hiilidioksidia kuin raskaan polttoöljyn käyttö (esim. Kristensen 2012, 21). Mikäli palopro-
sessissa syntyy metaanipäästöjä, noin 6 g/kWh metaanin päästö on vielä edullinen kasvihuonekaasujen kannalta ($25 \times 6 \text{ g/kWh} = 150 \text{ g/kWh}$ hiilidioksidiekvivalentti). On kuitenkin todettava, että lukuarvoon vaikuttavat merkittävästi ne oletukset, joita tehdään maakaasun tuotannon ja kuljetuksen aikaisista metaanipäästöjen suuruudesta (Contessi, 2013, 4). Esimerkiksi Einang (2011b) on kiinnittänyt huomiota

norjalaisten kaasulla toimivien laivojen moottoreiden metaanipäästöjen suuruuteen, varsinkin pienillä kuormilla. Myös MDO/HFO-poltossa syntyy metaanipäästöjä, suuruusluokkaa 0,5–1 g/kWh (Contessi 2013).

Bensiinimoottorin oktaanilukua vastaava suure otto-periaatteella toimiville kaasumoottoreille on metaaniluku. Maakaasun koostumus ja sen metaaniluku ovat erilaisia eri puolilla maailmaa. Metaaniluku vaihtelee tyypillisesti välillä 70–87. (Einang 2011a). Se vaikuttaa polttoaineen palamiseen ja siihen tehoon, joka moottorista saadaan (Buhaug 2011). Normaalisessa palamisessa polttoaineen ja ilman seoksen syttymisen jälkeen palorintama etenee tasaisesti ja paineen nousu sylinterissä on säännöllistä. Jos polttoaine-ilmaseos syttyy itsestään palorintaman ulkopuolelta, tapahtuu räjähdysmäistä palamista. Tämä aiheuttaa ylipaineipukkeja sylinterissä. Ilmiötä nimitetään nakutukseksi (Ott 2015, 10; Stenersen 2011), sillä paineipiikkeihin voi liittyä nakuttavaa ääntä. Ylipaineipiikit aiheuttavat rasiuksia moottorin osiin, ja se pyritään estämään. Nakutus voi aiheuttaa suuria kuormituksia moottorin rakenteissa, joten se pyritään estämään mm. paloprosessia säätämällä ja ajamalla moottoria osateholla. Turvallisuussyistä kaasumoottoreissa on värähtelyitä ja voimia tarkkailevia järjestelmiä nakutuksen ja sytytyskatkojen tunnistamiseen. Nakutusta mitataan moottorissa sylinterin paineesta ja nakutusantureilla, jotka mittaavat moottorin rakenteiden värähtelyjä.

5.2 Maakaasun käytön moottoriteknologiat ja niiden päästöt

Metaanin syttymislämpötila on niin korkea, että moottoreissa kaasu-ilmaseoksen sytyttämiseen käytetään moottoreissa joko sytytystulppia tai pilottipolttoaineen (esim. dieselöljy) ruiskutusta. Moottori voi toimia joko siten, että polttoainetta ja paloilmaa puristetaan yhdessä ja seos sytytetään ulkoisella lämmönlähteellä (otto-prosessi) tai dieselprosessilla, jossa paloilma puristetaan kuumaksi ja polttoaine ruiskutetaan siihen. Käytännön ero on siinä, että otto-prosessia käytettäessä palaminen tapahtuu alemmassa paineessa ja lämpötilassa, jolloin palamattoman metaanin määrä on suurempi kuin dieselprosessissa. Vastaavasti typen oksidien ja pienhiukkasten päästöt kasvavat dieselprosessia käytettäessä. Tällä perusteella voidaan erotella kolme eri moottorityyppiä (Einang 2011b).

Kipinäsytytteinen laihaseos- kaasumoottori

Kipinäsytytteisissä laihaseos-kaasumoottoreissa käytetään pelkästään kaasua polttoaineena. Ne toimivat otto-prosessin mukaan, ja kaasu sytytetään kipinällä. Kaasun paine on 4–5 baria. Ympäristöpäästöt ovat suhteellisen pieniä, ja moottorit täyttävät IMO tier III -vaatimukset. Ympäristövaikutuksia arvioitaessa on otettava huomioon metaanipäästöt kasvihuonekaasun lähteenä. Moottoreilla ei ole mainittavia ongelmia nykyisten typen oksidien tai partikkelipäästöjen rajojen suhteen.

Matalapaineinen kaksoispolttoaineella varustettu moottori

Matalapaineiset kaksoispolttoaineella varustetut moottorit käyttävät otto-prosessia, ja niissä kaasu sytytetään pilottipolttoaineella (dieselöljy). Kaasu syötetään moottoriin 4–5 barin paineella. Tekniikkaa voidaan käyttää sekä kaksitahti- että nelitahtikoneissa (Ott 2015). Moottoreilla on samat rajoitukset metaanipäästöjen suhteen kuin kaasumoottoreillakin. Typen oksidien tai partikkelipäästöjen suhteen ei ole ongelmia. Tarvittaessa moottorien polttoaineena voidaan käyttää myös diesel- ja raskasöljyä, mikä lisää joustavuutta varustamon kannalta.

Korkeapaineinen kaksoispolttoaineella varustettu moottori

Kaksoispolttoaineella varustetun moottorin kaasunsyöttö voidaan toteuttaa myös korkeapaineisena (300–350 bar). Tällöin metaanin läpäisy on suuruusluokkaa 0.2 g/kWh, ja se ei ole herkkä moottorin kuormituksen suuruudelle (Pospiech 2014). Muiden pakokaasupäästöjen hallintaan voidaan tarvita lisälaitteita. Moottoreita voidaan käyttää myös nestemäisillä polttoaineilla, kuten diesel- ja raskasöljyllä ja ne voidaan toteuttaa sekä kaksi- että nelitahtisina.

5.3 Metaanipäästöjen pienennyskeinot

Kaasun korkeapaineruiskutuksella varustetuissa kaksitahtidieseleissä metaanipäästöt ovat pieniä, mutta typen oksidien ja pienhiukkasten päästöjen hallitsemiseksi tarvitaan lisälaitteita. Varsinkin nelitahtimoottoreissa tekninen kehitys jatkuu, jolloin metaanijäämien osuus tulee pienemään. Metaanipäästöjä moottoreissa voidaan pienentää muun muassa säätämällä polttoineen ruiskutuksen ajoitusta, ahtopainetta ja ahtoilman lämpötilaa. Päästöjä voidaan pienentää myös myös paloilman

ohivirtausventtiilin käytöllä, sytytyksen säädöllä, sylinterien lepuuttamisella, puristussuhteella, pilottipolttoaineen määrän säädöllä ja pakokaasun takaisinkierätyksjärjestelmän (EGR) käytöllä. Pakokaasujen puhdistus esimerkiksi hiekkapedin tai hapettavan katalysaattorin avulla on myös mahdollista, mutta käyttökustannukset, energian kulutus ja laitteiden tilantarpeet asettavat rajoituksia (Sames ym. 2012, European Union 2015). Metaanin korkea syttymislämpötila vaikeuttaa sen poistamista pakokaasuista.

5.4 Esimerkki moottorien läpi palamatta kulkevan metaanin vaikutuksesta

Maakaasukäyttöistä autolauttaa operoiva Viking Line ilmoittaa monipuolisessa ympäristöraportissaan yrityksen vuotuiseksi LNG-kulutukseksi noin 16.000 t LNG:tä (Viking Line 2016). Tämä määrä tuottaa (Kristensen 2012, 9) atomipainojen suhteessa noin $2,75 \times 16.000 \text{ t} = 44.000 \text{ t}$ hiilidioksidipäästöt täydellisesti poltettuna, kun kaasun oletetaan koostuvan kokonaisuudessaan metaanista. Jos esimerkiksi yksi prosentti metaania tästä määrästä jäisi palamatta, olisi sen hiiliekvivalentti vakiokertoimella $25 \times 160 = 4000 \text{ t}$ (noin 9 %). Laivojen tavallisille polttoaineille voidaan käyttää esimerkiksi arvoa 3,17 t hiilidioksidia per tonni polttoainetta, MDO:lle 3,082 (Psaraftis ja Kontovas 2009, 4.). Laivojen operoinnin kasvihuonekaasujen vähentäminen on siis mahdollista, mutta päästöjen tarkempaa mittausta tarvitaan. Asiaan palataan projektin seuraavassa raportissa.

6 LNG-tankkauksen päästöjen mittaus

Tankkaus voidaan suorittaa säiliöautosta, erillisestä bunkkerialuksesta tai kiinteästä säiliöstä. Ennen tankkausta siirtoputket ja liittimet tarkastetaan. Liittimien tiivisteet vaihdetaan määräajoin huolto-ohjelman mukaisesti.

Tankkaus aloitetaan kytkemällä maadoitus ja tankkausletku alukseen. Tankkauksen aikana mahdollisia vuotoja tarkkaillaan metaania haistelevan anturin avulla. Anturin havaitessa vuodon se katkaisee alukseen tulevan LNG:n automaattisesti. Tankkauksen jälkeen täyttöputki huuhdellaan typpellä ja huuhtelukaasu johdetaan tankattavassa aluksessa olevaan purkumastoon. Kun tankkaukset tehdään toisesta aluksesta tai säiliöautosta, tankkaamiselle ei tarvita varsinaista lupaa muutoin kuin paikalliselta pelastuslaitokselta.

6.1 Tankkauksesta johtuvat ilmapäästöt

LNG-tankkauksessa syntyvien päästöjen mittaustuloksia ei ole julkisesti saatavilla mutta laskennallisia arvioita on olemassa (Holden 2014). Tankkausta suorittavien tai LNG:tä tuottavien tahojen arvioiden mukaan tankkauksen eli letkuista ja liittimistä syntyvien päästöjen määrät ovat hyvin pieniä. Suurimmat päästöt ilmaan syntyvät siinä vaiheessa, kun tankkaus lopetetaan ja tankkaus letku huuhdellaan typpellä ja typpi-LNG -kaasuseos johdetaan aluksen kaasupurkumastoon tms. josta se leviää ilmaan. Putkien typpellä huuhtelun päästövaikutuksia tai määriä ei tiedetä täsmällisesti, mutta sen suuruusluokka voidaan laskea.



KUVA 1.
Viking Grace- aluksen kaasunpurkumasto.



KUVA 2.
Kaasunpurkumastoon tulevat hönkäputket.

6.2 LNG-tankkauksen päästöjen mittaaminen

Tankkauksen aikaisia päästöjä voidaan mitata FID-analysaattorilla, FTIR-analysaattorilla tai adsorboimalla ilmaa tankkausletkun ja liittimen läheisyydestä. Adsorbointimittauksen etuna on se, että siinä voidaan havaita hyvin pienet pitoisuudet, kun taas esimerkiksi FID-analysaattorilla pitoisuudet pitää olla yli 1 ppm. On olemassa sähköisiä antureita ja kennoja, jotka perustuvat sähkön johtavuuteen tai infrapunatekniikkaan. Näitä laitteita käytetään lähinnä vuotojen valvontaan ja ne eivät sovellu pienien pitoisuuksien mittaamiseen. Mitattava näytekaasu johdetaan mittalaitteelle inerttiä, esimerkiksi teflonilla päällystettyä näytelinjaa pitkin. Näytteen kuivaaminen tai laimentaminen paineilmatoimisen laimentimen avulla ei ole tarpeellista. Mutta jos epäillään, että mitattava pitoisuus olisi esimerkiksi kaasuvuodon takia suuri, niin näyte tulisi laimentaa mittalaitteelle sopivaan pitoisuuteen. Mittausten aikana mittausdataa tulee kerätä suuruusluokkaa sekunnin välein, koska mahdolliset metaanipäästöt voivat olla lyhytaikaisia piikkejä.

Metaanipäästöjä voidaan mitata IR-, FTIR-, ja FID-menetelmiin perustuvilla mittalaitteilla sekä adsorboimalla näyte aktiivihiileen ja tutkimalla se laboratoriossa.



KUVA 3.
Mittalaite mittauskohteessa.

Infrapunavaloon perustuva mittaus

Infrapunamittaus (infrared, IR-tekniikka) perustuu siihen, että säteilylähteestä lähtevä valo kulkee sekä vertailukennon että näytekennon läpi ilmaisimelle. Vertailukennon sisältää kaasua, joka ei absorboi valoa, kuten typpeä tai argonia. Kun valo kulkee tällaisen vertailukennon läpi, sen energia ei muutu. Valon kulkiessa tutkittavaa kaasua sisältävän näytekennon läpi, valo absorboituu tähän kaasuun, jolloin kennon läpäisevän valon määrä pienenee. Ilmaisimella tunnetaan näin saadun energiamäärän, josta kaasun pitoisuus voidaan määrittää.

Infrapunatekniikassa kaasun absorptioon vaikuttaa lämpötila ja paine, mikä nykyisissä analysaattoreissa on otettu huomioon jo valmistusvaiheessa. Ongelmana IR-tekniikassa on se, että jotkut kaasut absorboivat valoa samalla aallonpituusalueella kuin mitattava kaasu. Esimerkiksi kosteus häiritsee metaanin mittausta sitomalla osan päästöstä veteen. Käytetyt mittalaitteet voidaan jakaa ei-dispersiivisiin ja dispersiivisiin analysaattoreihin. Ei-dispersiivisissä analysaattoreissa aallonpituuskaista valitaan optista suodatinta käyttäen mitattavalle kaasulle sopivaksi ja laitteet ovat pääsääntöisesti ns. yksikomponenttianalysaattoreita. Dispersiivisissä analysaattoreissa puolestaan analysoidaan laajempi aallonpituuskaista ja tällainen analysaattori on mm. FTIR-analysaattori.

FTIR-tekniikka, Fourier transform infrared (Fourier-muunnokseen perustuva infrapunatekniikka)

FTIR:n avulla voidaan määrittää yhdellä analysaattorilla jatkuvatoimisesti useita eri yhdisteitä samanaikaisesti. Mittauksen tuloksena on spektri, josta voidaan määrittää kvalitatiivisesti, mitä komponentteja näytekaasussa esiintyy. Kvantitatiivinen analyysi tehdään absorptioviivojen voimakkuuksien perusteella. FTIR-tekniikan etuna on se, että analysointi tapahtuu kosteista kaasuista, jolloin kuivauksen mahdolliset riskit poistuvat.

FID-tekniikka, Flame ionisation detector (liekki-ionisaatioon perustuva mittaustekniikka)

Liekki-ionisaatioon perustuvassa analysaattorissa näyte johdetaan laitteen ilmaisiin, jossa näytekaasun hiiliatomit palavat yhdessä polttokaasun kanssa ja ionisoituessaan hiiliatomit aiheuttavat mitattavan sähkövirran.

Liekki-ionisaatioilmaisimen pääosat ovat polttokammio ja poltin. Polttokaasu, joko vety tai vety-heliumseos, sekä näytekaasu johdetaan suuttimen läpi ja palamisilma suuttimen ympärillä olevan raon kautta polttokammioon. Pelkkä vety tuottaa palaessaan vähän ioneja, mutta jos näytekaasussa on orgaanisia yhdisteitä, niistä syntyy hiili-ioneja. Liekki-ionisaatioilmaisimella on erilainen vaste eri orgaanisille yhdisteille. FID-tekniikalla näyte voidaan tutkia kosteana, jolloin kuivauksen riskit poistuvat.

Adsorptiotekniikka

Adsorptiossa kaasumainen aine muodostaa ohuen kalvon kiinteän aineen pintaan. Metaanipäästöjä mitattaessa käytetään aktiivihiiლისუodatinta näytteen adsorpoimiseen.

Adsorptiossa näyte imetään alipainepumpulla mittauskohteesta inertillä letkulla aktiivihiiლისუodinputken läpi. Tällä menetelmällä päästään hyvinkin tarkkaan, alle 1 ppm tarkkuuteen.

6.3 Mittausten turvallisuus

Mittauskohde eli tankkausletku tai kaasunpurkumasto sijaitsee räjähdysvaarallisella alueella (tilan määre ATEX tai EX), jonne räjähdysuojaamattomia mittalaitteita tai välineitä ei voi asentaa. Mittaukset pitääkin tehdä niin, että räjähdysuojaamattomat laitteet sijaitsevat alueen ulkopuolella ja mittauskohteessa on vain näytelinja, jonka läpi mahdollinen päästökaasu imetään mittalaitteille.

Mittaajien tulisi käyttää mittausten aikana henkilökohtaisia kannettavia kaasuilmaisimia, jotta mahdolliset yllättävät kaasuvuodot voidaan havaita ajoissa. Muutoin päästöjen mittaamiseen ei liity erityisiä turvallisuusriskejä.

7 Johtopäätökset

Tämän kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että maakaasun päästöön johtavat onnettomuudet ovat harvinaisia, ja suurikin LNG-vuoto, esimerkiksi tuhat tonnia, on suhteessa tuotannon, siirron ja käytön ekvivalentteihin päästöihin verrattain pieni. Satamien ja LNG:llä operoivien varustamoiden kannalta maakaasun käytön turvallisuudesta huolehtiminen minimoi hyvin myös kaasun tahattomat päästöt ympäristöön. Kirjallisuuden perusteella on todennäköistä, että päästöt tankkauksen aikana ovat pieniä verrattuna käytön päästöihin. Samaten suuren yksittäisen onnettomuuspäästön merkitys ympäristölle lienee suhteellisen pieni normaalin käytön hiilidioksidipäästöihin verrattuna, koska suuret päästöt ovat harvinaisia. Näiden päästöjen suuruusluokkaa satamissa tulisi tutkia vielä jonkin verran lisää. Samaten moottorien läpi kulkevan, palamattoman metaanin määrä on kiinnostava. Kun moottoriteknologia kehittyy, muiden metaanilähteiden merkitys korostuu, ja on hyödyllistä tuntea esimerkiksi tankkauksen päästöt tarkemmin.

Koko kuljetusketjun kannalta päästöjen minimoinnissa on tärkeä keskittyä kaasun tuotannon, kuljetusten ja käytön aikaisiin päästöihin, joihin parhaat vaikutusmahdollisuudet ovat energian toimittajilla ja moottorivalmistajilla. Polttoaineiden vertailuissa tulee ottaa huomioon kasvihuonekaasujen lisäksi myös typpi-, rikki- ja partikkelipäästöt.

Lähteet

American Petroleum Institute. 2015. Consistent Methodology For Estimating Greenhouse Gas Emissions From Liquefied Natural Gas (LNG) Operations., <http://www.api.org/~media/Files/EHS/climate-change/api-lng-ghg-emissions-guidelines-05-2015.pdf>

Baik, J., Raghunathan, V., Witlox, H.. 2006. Consequence Modelling of LNG Marine Incidents. ASSE-MEC-0306-15.American Society of Safety Engineers, Middle East Chapter. 7th Professional Development Conference. Bahrain. https://www.dnvgl.com/Images/Consequence%20Modelling%20of%20LNG%20Marine%20Incidents%202006_tcm8-13556.pdf

Buhaug, Ø. 2011. Combustion characteristics of LNG. LNG Fuel Forum, 21. September 2011. Stockholm. <http://www.glmri.org/downloads/LngMisc/Combustion%20Characteristics%20of%20LNG-Oyvind%20Buhaug-21%20Sept%202011-II.pdf>

Contessi, C. 2013. Gas engine emissions Wärtsilä Dual Fuel. 16 December 2013. Leer. http://www.lng-nordwest.de/files/lng_downloads/WS_131216/20131216%20Wartsila%20Leer_DF%20emission%20conference.pdf

Curt, B. 2004. Marine Transportation of LNG. Intertanko Conference March 29, 2004. <http://www.intertanko.com/upload/presentations/curt.pdf>

Einang, P.M., 2011a. LNG a future maritime fuel. Presentation Hamburg 6th of May 2011. Marintek. Trondheim. http://norwegen.ahk.de/fileadmin/ahk_norwegen/Dokumente/Presentationen/clean_shipping/Marintek.pdf

Einang, P.M., 2011b. Further development of technology for operation on LNG. Presentation at Cimac Circle 26th of May 2011. Marintek. Trondheim. http://www.cimac.info/cms/upload/events/other_events/2011/Per_Magne_Einang.pdf

European Union 2015. LNG for shipping. <https://lngforshipping.eu/lng-for/engine-manufacturers>

Gasum 2013. Gasumin vuosi 2013. Espoo

Grahn, M., Taljegård, M., Bengtsson, S., Andersson, K., Johnson, H. 2013. Cost-effective choices of marine fuels under stringent carbon dioxide targets. Conference Proceedings. 3rd International Conference on Technologies, Operations, Logistics and Modelling in Low Carbon Shipping, University College London, 9-10 September 2013. http://fy.chalmers.se/~np97magr/Grahn_et_al_2013_LCS_conference.pdf

Hagedorn, M. 2014. LNG Engines SPecifications and Economics. LNG shipping Rostock 13.10.2014. Rostock. <http://www.golng.eu/files/Main/20141017/Rostock/LNG%20Shipping%20Session%20II%20-%20LNG%20Engines-Specifications%20and%20Economics-%20W%C3%A4rtsil%C3%A4,Ship%20Power%20-%20Hagedorn.pdf>

Haraldson, L. 2011. LNG as a fuel for environmentally Friendly Shipping. 33rd Motorship Propulsion & Emissions Conference. 11-12 May 2011. Copenhagen. <http://www.dma.dk/themes/LNGinfrastructureproject/Documents/Bunkering%20operations%20and%20ship%20propulsion/Wartsila-SP-ppt-2011-LNGretrofit.pdf>

Hightower, M., Gritzo, L., Luketa-Hanlin, A., Covan, J., Tieszen, S., Wellman, G.; Irwin, M., Kaneshige, M., Melof, B.; Morrow, C., Ragland, D. 2004. Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas (LNG) Spill Over Water . SANDIA REPORT SAND2004-6258. Sandia National Laboratories.

Hightower, M., Petti, J., Lopez, C. 2013. Risk mitigation of LNG ship damage from large spills Sandia National Laboratories. 17th International Conference & Exhibition On Liquefied Natural Gas (LNG 17). April 17, 2013. Houston. http://www.gastechnology.org/Training/Documents/LNG17-proceedings/5-6-Mike_Hightower.pdf

Holden, D. ym. 2014. Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study. DNV GL – Report No. PP087423-4, Rev. 3. Maritime Administration. <http://www.marad.dot.gov/wp-content/uploads/pdf/DNVLNGBunkeringStudy3Sep14.pdf>

International Maritime Organization (IMO). 2007. Formal Safety Assessment – Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers. Maritime Safety Committee. MSC 83/INF.3. http://www.rina.org.uk/hres/msc%2083_inf_3.pdf

Kristensen, H.O. 2012. Energy Demand and Exhaust Gas Emissions of Marine Engines. Project no. 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesystem. Technical University of Denmark. <https://www.shipowners.dk/.../wp-2-report-5-energy-demand-and-emissions-of-marine-engines.pdf>.

Kruyt, B. 2012. Propulsion Retrofit Solutions, Technical aspects. Maritiem Milieu Seminar 2012. Delft. http://www.maritim-de-nl.eu/cms_uploads/files/maritiem_milieu_seminar_-_wartsila-1.pdf

LaFleur, C., Groth, K. Liao, H., Lopez, C., Muna, A. 2015. LNG Safety Assessment Evaluation Methods, Task 3 Letter Report. Report no. SAND2015-3859R. U.S. Department of Transportation. Washington D.C.

Liquefiedgascarrier.com, 2016. Potential hazards of a large liquefied natural gas spill during marine transportation. <http://www./LNG-spill-risk.html>

Liikenne- ja viestintäministeriö 2012. LNG-toimintaohjelma 2013 – 2017- nesteytetyn maakaasun käyttöönotto laivaliikenteessä

LNG Ship Fuel Safety Advisory Group. 2013. Standards and Guidelines for Natural Gas Fuelled Ship Projects. The Society of International Gas Carrier and Terminal Operators (SIGTTO) and the Society for Gas as a Marine Fuel (SGMF). <http://www.sgmf.info/media/5637/standards-guidelines-natural-gas-fuelled-v5k1.pdf>

Luketa, A., Hightower, M., Attaway, S. 2008. Breach and Safety Analysis of Spills Over Water from Large Liquefied Natural Gas Carriers. Report no. SAND2008-3153. U.S. Department of Transportation. Washington D.C.

NesteJacobs 2014. Venäjältä suomeen tuodun maakaasun tuotanto- ja käyttöketjun ympäristövaikutukset. Projektinumero MOCK3. Porvoo. http://gasum.fi/globalassets/esitykset/maakaasu_-tuotanto-_ja_kayttoketjun_ymparistovaikutukset.pdf

Ott, M. 2015. Low pressure gas engines “The industry standard” CIMAC discussion Athens 22. January 2015. Athens. http://www.lme.ntua.gr:8080/whats-new/news-1/03_MO.pdf/

Ott, M. 2014b. Wärtsilä Two-stroke Dual Fuel. Technology Responding to Changing Market Needs. 5TH CIMAC CASCADES, 23. October 2014. Busan. http://www.cimac.com/cms/upload/events/cascades/cascades_2014_busan/presentations/Presentation_Session3_Wartsila_CASCADES_Busan_2014_Marcel_Ott.pdf

Ott, M. 2014a. WÄRTSILÄ 2-STROKE DUAL FUEL TECHNOLOGY CIMAC NMA NORGE ANNUAL MEETING 22.01.2014. Norway. <http://www.sintef.no/globalassets/upload/marintek/cimac2014/6---2-s-df-technology-cimac-norway-jan-22-2014.pdf>

Parfomak, P.W., 2008. Liquefied Natural Gas (LNG) Infrastructure Security: Issues for Congress. CRS Report for Congress. Washington D.C. <https://www.hsdl.org/?view&did=486464>

Pospiecl, P. 2014. Is Internal Combustion Engine Methane Slip Harmful to the Environment? Maritime Reporter and Engineering News. April 2014 p.32.

<http://magazines.marinelink.com/Magazines/MaritimeReporter/201404/content/internal-combustion-environment-467470>

Psaraftis, H.N. and Kontovas C.A. 2009. CO2 Emission Statistics for the World Commercial Fleet. WMU Journal of Maritime Affairs 2009. World Maritime University.

Quillen, D. 2012. LNG Safety Myths and Legends. Natural Gas Technology -Investment in a Healthy U.S. Energy Future. Houston.

<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/ngt/quillen.pdf>

Robinson, D. 2006. Liquefied Natural Gas Emissions Reduction Opportunities. ICF International. In: U.S. Environment Protection Agency 2006.. Producers and Processors Technology Transfer Workshop. ConocoPhillips and EPA's Natural Gas STAR Program Kenai, AK May 25, 2006. Kenai.

http://www3.epa.gov/gasstar/documents/workshops/kenai-2006/lng_opportunities.pdf

Ruonakoski, T. 2011. Suomeen tuotavan maakaasun polttoaineketjun kasvihuonepäästöt. Aalto-yliopiston julkaisusarja TIEDE + TEKNOLOGIA 9/2011. Espoo. ISBN 978-952-60-4128-5

Sames, P.C., Clausen, N.B, Andersen, M.L.. 2012. Costs and Benefits of LNG. M.A.N. Diesel and Turbo. http://www.corporate.man.eu/man/media/content_medien/doc/global_corporate_website_1/verantwortung_1/megatrends_2/klimawandel/me_gi_dual_fuel_en_03.pdf

Society of International Gas Tanker & Terminal Operators Limited (SIGGTO). 2012. Guidance for the Prevention of Rollover in LNG Ships. Bermuda. http://www.sgmf.info/media/5648/prevention_of_rollover_on_lng_ships.pdf

Stenersen, D. 2011. Gas-Fuelled Engines and Fuel Systems for Medium-Speed Engines in Maritime Applications. TPG Natural Gas 2011 4140 SINTEF. Marintek. Trondheim. <http://www.ipt.ntnu.no/~jsg/undervisning/naturgass/lysark/Lysark Stenersen2011.pdf>

Tanker Shipping & Trade, 2012. CCR4 standard drives owner's decision to embrace LNG. Tanker Shipping & Trade February/March. <http://content.yudu.com/Library/A1vw1u/TankerShippingampTra/resources/content/22.swf>

Tyler, D. 2011. Environmental benefits of LNG as a marine fuel reduced by 'slippage' Nov 22, 2011 Professional Mariner.

<http://www.professionalmariner.com/December-January-2012/Environmental-benefits-of-LNG-as-a-marine-fuel-reduced-by-slippage/>

Vanem, E. et al. 2008. Analysing the risk of LNG carrier operations. Reliability Engineering and System Safety 93. pp. 1328–1344

Viking Line 2016. Avainlukuja . <http://www.vikingline.com/fi/Sijoittajat-ja-konserni/Turvallisuus-ja-ymparisto/Ymparisto/Avainlukuja/>

Woodward, J.L. & Pitblado, R.M. 2010. LNG Risk Based Safety - Modeling and Consequence Analysis. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Wärtsilä 2013. Wärtsilä DF engines environmental impact. Presentation on Nov. 28, 2013. Helsinki.