

UUPO – Merilogistiikan uudet polttoaineet vihreän
siirtymän ja sinisen kasvun vauhdittajina

Polttoaine Tietopaketti: LNG ja Metaani



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu



SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta

2024

Perustietoa

LNG ja metaani

LNG, eli nesteytetty maakaasu, on pääosin metaanista koostuva (~ 85–95 %) polttoaine. Metaani (CH_4) itsessään on hiilipohjainen yhdiste, joka muodostuu yhdestä hiili ja neljästä vetyatomista.

LNG:n käyttö on viime vuosina lisääntynyt ja erityisesti merenkulussa sen suosio on kasvanut merkittävästi. Kasvu näkyy myös tilauksessa olevista aluksista, sillä DNV:n 2023 arvion mukaan jopa 60 % kaikista tilauksessa olevista aluksista, jotka käyttävät vaihtoehtoisia polttoaineita, oli LNG aluksia. ^[1]

Nesteytetyn maakaasun kasvu selittyy osittain sen ympäristöystävällisistä ominaisuuksista verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, kuten raskaaseen polttoöljyyn ja dieseliin. LNG tuottaa poltettaessa huomattavasti vähemmän NOx-, SOx- ja pienhiukkaspäästöjä, mikä auttaa vähentämään merenkulun ai-

heuttamia ilmansaasteita. ^[2] Perinteisen LNG:n potentiaalista vähentää merilogistiikan kasvihuonekaasupäästöjä on myös uutisoitu laajalti, mutta viime vuosien tutkimukset ovat osoittaneet, että sen käyttö saattaa itse asiassa pahentaa ilmastomuutosta. Suurimmat syyt tälle ovat LNG:n valmistuksen ja käytön yhteydessä syntyvät metaani hajapäästöt, sekä laivojen polttomoottoreista ilmakehään vapautuva palamaton metaani. ^[3] Hajapäästöillä viitataan päästöihin, joita syntyy esimerkiksi putkivuotojen ja muiden hallitsemattomien lähteiden kautta.

Varustamot, jotka käyttävät aluksissaan nesteytettyä maakaasua voivat osittain välttää polttoaineen valmistuksen aikana syntyvistä metaani hajapäästöistä käyttämällä biotai synteettistä LNG:tä, joiden elinkaaripäästöt ovat huomattavasti matalammat kuin perinteisen nesteytetyn maakaasun. ^[4]

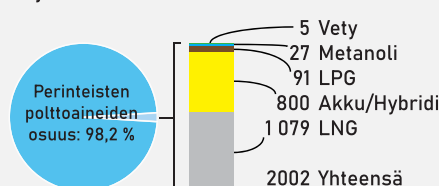
Tärkeät näkökohdat:

1. LNG on nopeiten kasvava vaihtoehtoinen polttoaine
2. Perinteisen LNG:n käyttö tuottaa saman verran tai jopa enemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin muut fossiiliset polttoaineet
3. LNG ei tuota juuri lainkaan SOx- tai pienhiukkaspäästöjä, sekä LNG:n NOx-päästöt ovat noin 90% pienemmät kuin perinteisten merenkulun polttoaineiden
4. Bio- ja e-LNG:tä voidaan käyttää drop-in polttoaineena nykyisissä LNG aluksissa
5. Maakaasulla on jo paljon rakennettua infrastruktuuria, mikä helpottaa perinteisen LNG:n, sekä bio- ja e-LNG:n laajempaa käyttöä merenkulussa

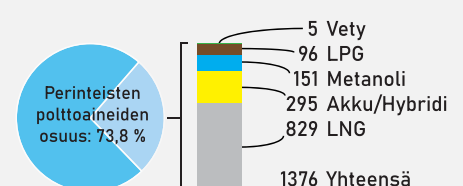
Kuvio 1. Maailman laivaston vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön otto alusten määrän mukaan (yläosa) ja bruttovetoisuuden mukaan (alaosa), heinäkuu 2023

Alusten määrä

Käytössä olevat alukset

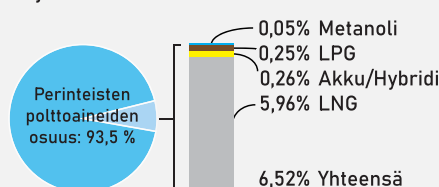


Tilauksessa olevat alukset

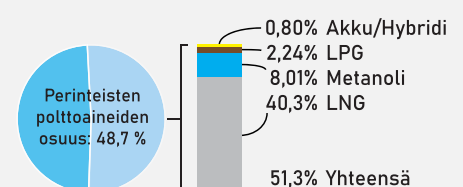


Bruttovetoisuus

Käytössä olevat alukset



Tilauksessa olevat alukset



Valmistusmenetelmät



Tyypillisesti LNG luokitellaan fossiiliseksi polttoaine, koska sitä valmistetaan maakaasusta. Tätä fossiilista LNG:tä kutsutaan joko harmaaksi LNG:ksi tai siniseksi LNG:ksi, mikäli tuotantoprosessin aikana syntyneitä kasvihuonekaasupäästöjä on estetty pääsemästä ilmakehään. On kuitenkin olemassa kestävämpiä vaihtoehtoja harmaalle ja siniselle LNG:lle, kuten bio-LNG ja synteettinen eli e-LNG. Nämä kestävämmät vaihtoehdot tunnetaan yhteisnimellä vihreä LNG ja ne tuottavat huomattavasti vähemmän päästöjä elinkaartensa aikana kuin fossiilisista lähteistä peräisin olevat LNG:t. [5]

Harmaa LNG

Harmaata LNG:tä valmistetaan poraamalla maakaasua maaperässä olevista maakaasuesiintymistä.

Maakaasua voi myös löytyä öljyesiintymien yhteydessä. Esiintymästä riippuen erilaisia porausmenetelmiä käytetään, kuten perinteistä porausta tai hydraulista murtamista. Perinteisessä porauksessa poranterät lävistävät maaperän kerrokset, kun taas hydraulisessa murtamisessa maahan ruiskutetaan paineella vettä, sekä kemikaaleja, mikä murskaa kallioperää ja vapauttaa maakaasua. Porausmenetelmän valinta riippuu muun muassa maakaasuesiintymän syvyydestä, sekä koostumuksesta. Porausvaiheen jälkeen maakaasu otetaan talteen esiintymästä ja kuljetetaan yleensä putkistoilta tuotanto- tai jalostuslaitokselle, missä se puhdistetaan ja erotellaan muista aineista. Puhdistettu maakaasu voidaan

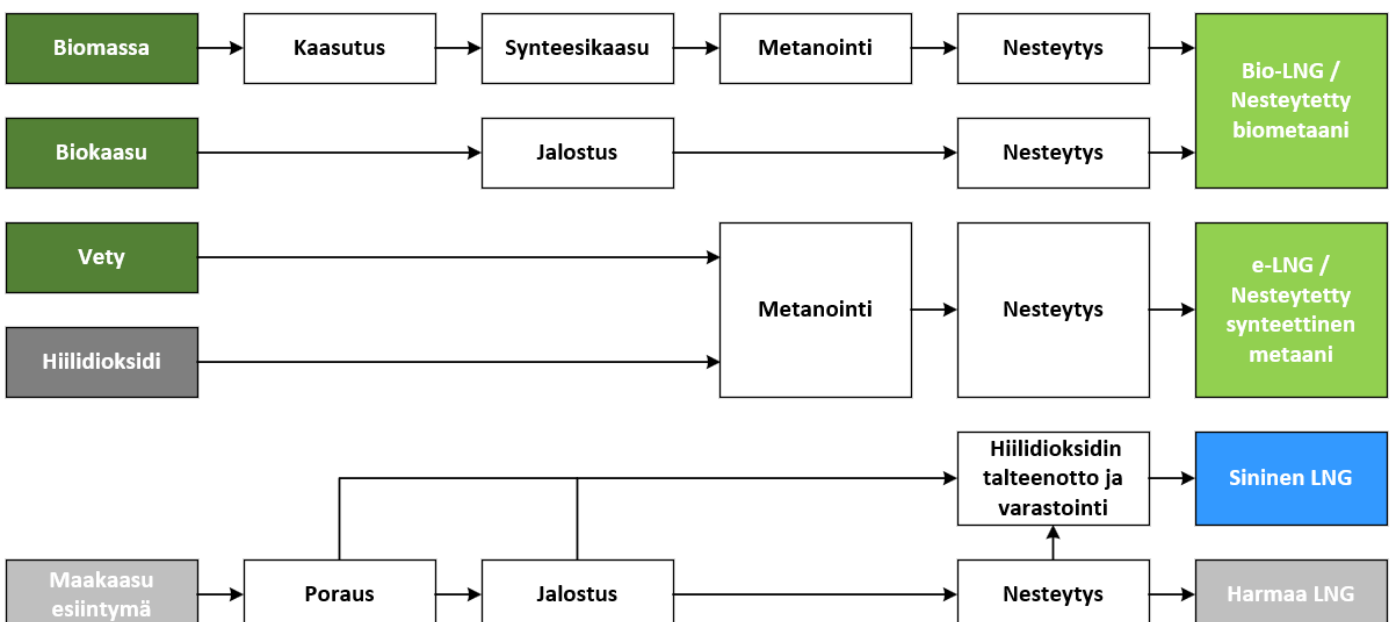
nesteyttää, jolloin sen kuljetaminen ja varastointi onnistuu helpommin. [6]

Harmaan LNG:n tuottaminen aiheuttaa paljon kasvihuonekaasupäästöjä, sillä kaasumaisessa muodossa maakaasu pääsee helposti ilmakehään poraus- ja kuljetusvaiheiden aikana. [7] Tämän lisäksi tuotantolaitokset tuottavat paljon muita päästöjä, jotka ovat haitallisia, sekä lähialueen ympäristölle, että alueella asuville yhteisöille ja ihmisille. [8]

Sininen LNG

Sinistä LNG:tä tuotetaan samalla tavalla kuin harmaata LNG:tä, mutta tuotantoprosessin aikana syntyneet kasvihuonepäästöt estetään osittain pääsemästä ilmakehään erilaisilla teknologilla ratkaisulla. Esimerkkejä

Kuvio 2. LNG:n ja muiden metaanipohjaisten polttoaineiden valmistuksen päämenetelmät



Valmistusmenetelmät



tästä ovat muun muassa hiilidioksidin talteenotto, missä syntyneet päästöt otetaan talteen ja loppusijoitetaan geologisiin varastoihin. Talteen otettu hiilidioksidi voidaan myös hyötyä käyttää erilaisissa prosesseissa kuten synteettisten polttoaineiden valmistuksessa.

Sinisen LNG:n ongelmana on, että tällä hetkellä merkittävä osa talteen otetusta hiilidioksidista käytetään EOR- eli enhanced oil recovery-menetelmää varten. Tässä menetelmässä talteen otettu hiilidioksidi ruiskutetaan öljyesiintymään, mikä lisää kyseisen porakaivon öljyntuotantoa. Tämä ongelma koskee kaikkia "sinisiä" uusia polttoaineita, mutta erityisesti sinisen LNG:n kohdalla se on merkittävä, koska maakaasua saatetaan tuottaa samoista

porakaivoista kuin öljyä. Tämä tarkoittaa, että vaikka sinisen LNG:n käyttö voi vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna perinteisiin polttoaineisiin, sen ympäristöetuja voidaan kyseenalaistaa, koska hiilidioksidia palautetaan takaisin ilmakehään öljyn tuotannon tehostamisen seurauksena. [9]

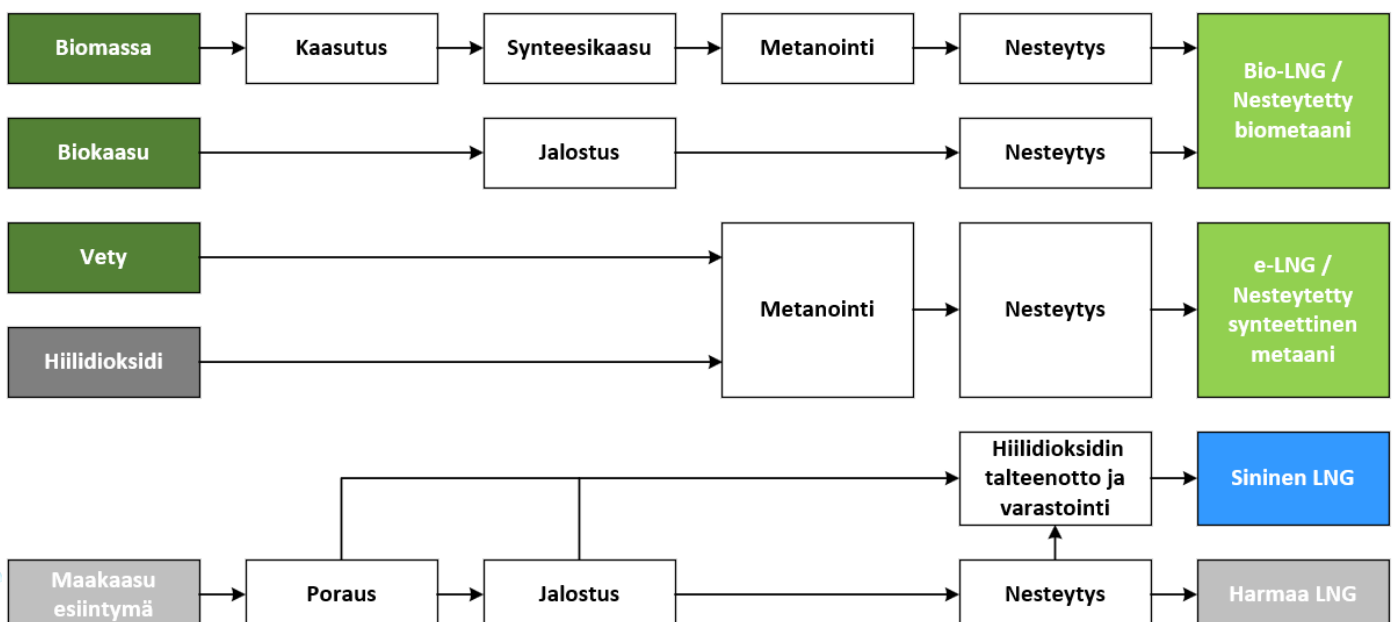
Vihreä LNG

Vihreä LNG voidaan karkeasti jaotella kahteen eri kategoriaan: bio-LNG ja synteettinen eli e-LNG. Näistä saatetaan myös käyttää lyhenteitä LBM (Liquified Biomethane) ja LSM (Liquified Synthetic Methane). Vihreää LNG:tä voidaan käyttää samalla tavalla kuin perinteistä fossiilipohjaista LNG:tä, vähentäen näin fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tuottamia

kasvihuonekaasupäästöjä. [10]

Bio-LNG:tä valmistetaan muutamalla eri tavalla, mutta yleisin tapa on valmistaa sitä biokaasusta. Raaka-aineina biokaasulle toimii erilaiset biomassat, kuten maatalouden jäännökset, orgaaninen jäte, jätevesi, sekä energiakasvit. Biokaasun tuotanto alkaa biojätteen murskauksella, jonka jälkeen se sekoitetaan veden kanssa. Sekoituksen jälkeen biojäte siirretään siloihin, missä se käy läpi anaerobisen käymisprosessin, eli se mädäntyy hapettomassa tilassa mikrobien ja lämmön vaikutuksesta. Käymisprosessista syntyy biokaasua, joka koostuu pääasiassa metaanista, hiilidioksidista ja pienistä määristä muita kaasuja. Biokaasun lisäksi mädätysprosessista syntyy mädätysjään-

Kuvio 2. LNG:n ja muiden metaanipohjaisten polttoaineiden valmistuksen päämenetelmät



Valmistusmenetelmät



nöstä, jota voidaan käyttää esimerkiksi lannoitteiden tuotannossa. Biokaasun metaanipitoisuus on tyypillisesti noin 45–75 %, joten siitä erotellaan muut kaasut ja epäpuhtaudet, jolloin lopputuloksena saadaan biometaania, joka on koostumukseltaan lähes samanlaista kuin fossiilinen maakaasu. Valmista biometaania voidaan käyttää sellaisenaan tai nesteyttää, jolloin saadaan bio-LNG:tä. Kaatopaikat tuottavat myös biokaasua, kun yhdyskuntajäte mädäntyy ja tätä voidaan ottaa talteen kaatopaikkakaasu keräysjärjestelmillä. ^[11]

Toinen tapa valmistaa biometaania on biomassan kaasutus. Biomassan kaasutuksessa esimerkiksi puupohjaista biomassaa lämmitetään matala happisessa ja korkea paineisessa

ympäristössä, jolloin saadaan synteetikaasua, joka koostuu pääsääntöisesti hiilimonoksidista ja vedystä. Tätä tuotettua synteetikaasua putsataan ja käsitellään, jonka jälkeen se siirretään metanointireaktoriin. Reaktorissa synteetikaasun hiilimonoksidi ja vety reagoivat keskenään ja lopputuloksena syntyy biometaania. ^[12]

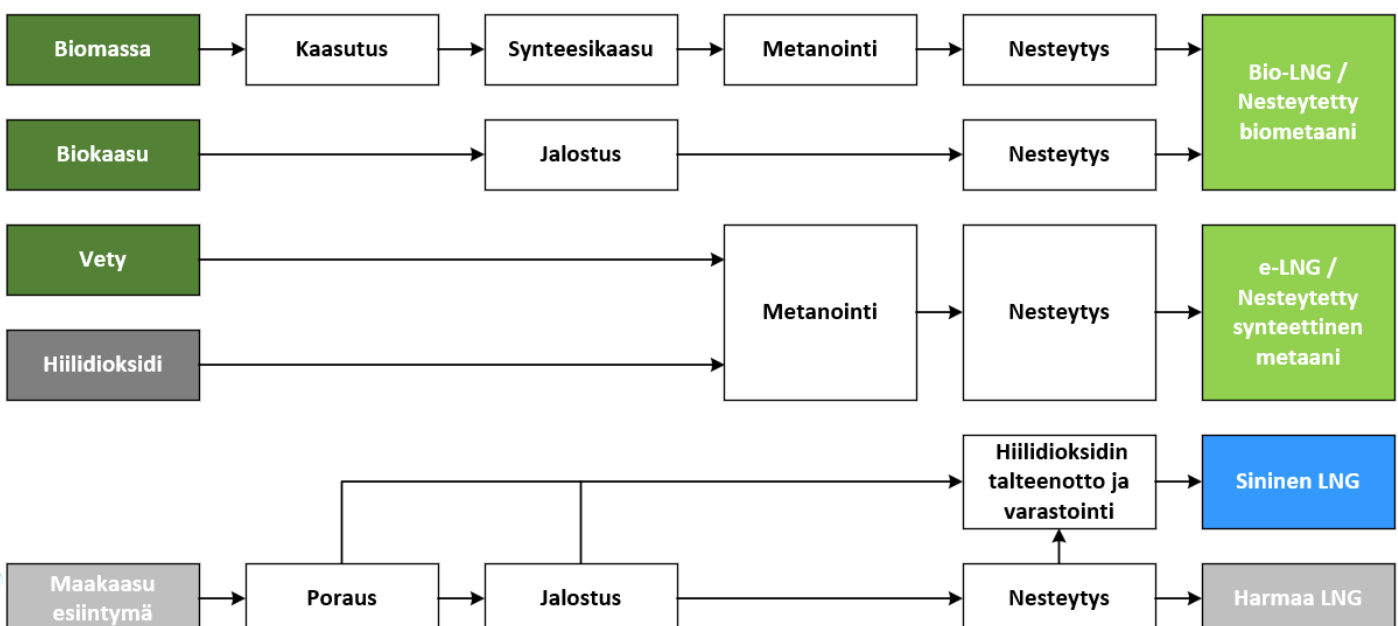
Noin 90 % tuotetusta biometaanista valmistetaan biokaasusta. ^[13] On hyvä huomioida, että riippuen lähteestä, biomassan kaasutuksella valmistettu metaani luokitellaan myös joskus synteettiseksi metaaniksi.

Synteettisen metaanin tuotantomenetelmät eroavat melko paljon biometaanin valmistusmenetelmistä. Tyypillisesti syn-

teettisen metaanin valmistus perustuu vedyn ja hiilidioksidin yhdistämiseen katalyytin avulla. Tämän tyyppisellä metaanilla voi olla erittäin alhaiset elinkaaren päästöt, mikäli sen valmistuksessa käytetty vety on tuotettu kestäväällä tavalla, kuten uusiutuvien energialähteiden ja elektrolyysin avulla. Hiilidioksidia sen sijaan ei tarvitse suoranaisesti tuottaa, vaan se voidaan ottaa esimerkiksi talteen lähteollisuuden tuottamista savukaasuista. ^[14]

Synteettisen metaanin metanointi prosessin katalyytti voi olla perinteinen metallikatalyytti, mutta prosessi voi myös pohjautua biologiseen katalyysiin, jolloin mikro-organismit tuottavat metaania hiilidioksidista ja vedystä. Tällöin kyseessä on biokatalyyttinen metanointi. ^[15]

Kuvio 2. LNG:n ja muiden metaanipohjaisten polttoaineiden valmistuksen päämenetelmät



Ominaisuudet ja turvallisuus



Polttoaine ominaisuudet

Nestemäisen maakaasun tehollinen lämpöarvo on toiseksi korkein kaikista meriliikenteen polttoaineista heti vedyn jälkeen. Matalan tiheyden vaikutuksesta kuitenkin sen energiatiheys on matalampi kuin muiden fossiilisten polttoaineiden. Tästä johtuen LNG tarvitsee noin kaksinkertaisen tilan verrattuna raskaaseen polttoöljyyn. ^[16]

Ennen kuin LNG:tä voidaan käyttää polttomoottorissa, se on ensin höyrystettävä takaisin kaasumaiseen muotoon, sekä paineistettava polttomoottorille sopivaan paineeseen. ^[17]

Turvallisuus

Nesteytetty maakaasu ei pala nestemäisessä muodossaan

vaan sen täytyy ensin höyrystyä ja sekoittua ilman kanssa, jotta se voi syttyä palamaan. Kaasumaisena se kuitenkin leviää nopeasti ympäristöön, mikä tekee tilanteiden hallinnasta vaikeaa vuodon ja palon sattuessa. ^[18]

Kaasumaisessa muodossa LNG ei ole myrkyllisiä ihmisille, mutta suljetuissa tiloissa se voi muiden kaasujen tavoin syrjäyttää hapen ja näin aiheuttaa tukehtumisvaaran. Tämän riskin minimoimiseksi on tärkeää varmistaa riittävä ilmanvaihto ja käyttää asianmukaisia kaasuhälyttimeitä, jotka voivat havaita hapen puutteen ajoissa. Näiden toimenpiteiden avulla voidaan myös vähentää riskejä, jotka liittyvät kaasun tunneen LNG:n paloturvallisuuteen. ^[19]

LNG:n käyttöön liittyy muitakin vaaroja. Erityisesti LNG:n äärimmäisen matala lämpötila voi aiheuttaa paleltumia ja muita kylmävammoja henkilöille, jotka ovat tekemisissä sen käsittelyn kanssa. Myös erilaiset vahingot materiaaleilla ovat mahdollisia vuotojen yhteydessä. Suuremmilta onnettomuuksilta voidaan välttyä kouluttamalla henkilöstöä, sekä käyttämällä kriittisillä alueilla materiaaleja, jotka kestävät LNG:n matalan lämpötilan vaikutukset. Lisäksi erilaiset varatoimeenpiteet saattavat olla välttämättömiä esimerkiksi bunkrauksen yhteydessä, joilla varmistetaan, että LNG ei aiheuta ylimääräistä vahinkoa aluksen rungolle tai muille osille ja että bunkraushenkilöstön turvallisuus ei ole uhattuna. ^[20]

Polttoaine	Energia ja säilytys					Syttvyys		
	Tiheys	Tehollinen lämpöarvo (LHV)	Energia-tiheys	Kiehumis-piste	Polttoaineen tilantarve vs LSHFO	Itsesyttymis-lämpötila ilmassa	Leimahdus-piste	Syttymis-rajat ilmassa
	[kg/m ³]	[MJ/kg]	[MJ/m ³]	[°C]		[°C]	[°C]	[%]
LSHFO	993	40,5	40 217	> 180	-	230	> 60	0,6 - 7,5
MDO	819	40,5	33 170	> 180	1,21	210	> 60	0,6 - 7,5
LNG	450	49,1	22 095	-162	1,82	540	-188	5,0 - 15,0
MeOH	792	19,9	15 761	65	2,55	464	12	6,7 - 36,0
EtOH	789	26,8	21 145	78	1,90	365	17	3,3 - 19,0
L NH ₃	680	18,6	12 648	-33	3,18	651	132	15,0 - 28,0
L H ₂	70	120	8 400	-253	4,79	585	-	4,0 - 75,0
FAME	880	37,2	32 736	> 180	1,23	261	> 61	0,6 - 7,5
HVO	780	44	34 320	> 180	1,17	204	> 61	0,6 - 7,5
FT-Diesel	785	43,2	33 912	> 180	1,19	204	89	0,6 - 7,5

Tuotanto



Maailmanlaajuinen tuotanto

Maailmanlaajuinen LNG-kauppa on kasvanut merkittävästi viime vuosina, ja vuonna 2022 LNG:tä kaupattiin lähes 400 miljoonaa tonnia, mikä oli noin 7 % enemmän kuin edellisellä vuonna. Vuonna 2022 Australia, Qatar ja Yhdysvallat vastasivat yhteensä 60 % maailman LNG-viennistä. ^[21] LNG-kaupan kasvu näkyy myös maakaasun nesteytyskapasiteetissa, joka on kasvanut vuosien 2010–2022 välillä noin 40 %. ^[22]

Suurin syy LNG:n kasvu on ollut sen laajentunut käyttö erilaisissa käyttösovelluksissa, mutta myös esimerkiksi Venäjän ja Ukrainan välinen sota on vaikuttanut Euroopan LNG kauppaan. Konflikti on synnyttänyt epävarmuutta Venäjän maakaasuntoimituksen suhteen ja lisännyt Euroopan kiinnostusta LNG:hen vaihtoehtoisena energialähteenä. Tämä näkyy erityisesti LNG:n tuonnin kasvuna, sillä vuonna 2021 Eurooppaan tuotiin alle 80 miljoonaa tonnia LNG:tä, kun taas seuraavana vuonna vastaava luku oli jo 121 miljoonaa tonnia. ^[23]

LNG:n käytön oletetaan jatkavan kasvua ja Shell'in arvion mukaan 2040 mennessä maailmanlaajuinen LNG:n tarve tulee olemaan noin 625–685 mil-

joonaa tonnia. ^[24]

Vaikka bio- ja e-metaanin tuotanto tulee kasvamaan nopeasti lähivuosina, niiden käyttöä merenkulussa rajoittavat silti muun muassa raaka-aineiden saatavuus, tuotantokustannukset, tuotantokapasiteetti, sekä kilpailu muiden alojen kanssa. Biometaania tuotettiin vuonna 2022 noin 7,4 miljardia m³, josta Euroopan osuus oli noin 4 miljardia m³. ^[25] Euroopan biokaasu yhdistyksen arvioiden mukaan vuoteen 2030 mennessä biometaania tuotettaisiin Euroopassa jopa 35 miljardia m³, mutta tämä määrä ei tule riittämään, sillä Euroopassa käytettiin vuonna 2022 noin 340 miljardia m³ maakaasua. ^[26] ^[27]

E-LNG:n tuotanto maailmanlaajuisesti vuonna 2020 oli käytännössä vielä nolla, mutta uusia laitoksia ja projekteja on suunnitteilla ja rakenteilla eri puolilla maailmaa, mikä viittaa siihen, että e-LNG:n tuotanto tulee kasvamaan merkittävästi tulevina vuosina. ^[28]

Tulevaisuuden näkymät Suomessa ja Satakunnassa

Suomen vesiliikenteen energiankulutus vuonna 2020 oli noin 1,75 TWh kun taas ulkomaanliikenteen energiankulutus Suomen talousvesillä oli 6,7 TWh. ^[29] Mikäli nämä en-

ergiatarpeet haluttaisiin kattaa biometaanilla, olisi Suomen biometaanin tuotannon moninkertaistettava, sillä vuonna 2022 Suomessa tuotetun biometaanin määrä oli noin 0,21 TWh. Biometaanin tuotannon odotetaan kuitenkin nousevan nopeasti sillä Suomessa biokaasu ja biometaani tuotantolaitoksia on rakenteilla ja suunnitteilla yli 40 kappaletta vuosien 2024–2027 välillä. Näiden uusien laitosten tuotantokapasiteetti on yhteensä 1,2 terawattituntia, ja yli 90 % siitä on biometaania. Iso osa näiden laitosten biometaanista on tarkoitettu nesteyttämään ja tämän jälkeen käyttämään raskaassa-, sekä meriliikenteessä. ^[30]

Satakunnan bio-, sekä synteettisen metaanin tulevaisuus näyttää lupaavalta. Esimerkiksi BioEnergo Oy on suunnittelemassa Meri-Poriin biokonversio-laitosta, joka tuottaisi sekä bioetanolia, että biomeetaanin. ^[31]

Synteettisistä metaania sen sijaan aletaan valmistaa Harjavallassa jo vuoden 2024 aikana Q Powerin toimesta. Kyseisen toiminta tulee tapahtumaan P2X Solutionsin vihreän vedyn tuotantolaitoksessa ja metaanointi prosessin vaatima hiilidioksidi hankitaan lähellä olevilta yrityksiltä ja toimijoilta. ^[32]

Tekniset näkökulmat

Infrastrukturi, kuljetus ja varastointi

Metaanipohjaisilla polttoaineilla on useita etuja infrastruktuurin näkökulmasta verrattuna muihin uusiin polttoaineisiin. Esimerkiksi Suomessa LNG:n bunkrauksesta on jo paljon tietoa ja kokemusta, mikä tekee prosessista luotettavaa ja tehokasta. Erityisesti Gasum:illa on pitkä historia LNG bunkrauksesta, sillä yritys suoritti koko Itämeren alueen ensimmäisen LNG bunkrauksen vuonna 2012. [33]

Lisäksi kaikkia metaanipohjaisia polttoaineita voidaan siirtää kaasumaisessa muodossa jo olemassa olevassa kaasuputkistoverkostossa. Suomen maakaasun siirtoverkoston pituus on noin 1200 kilometriä ja se pääsääntöisesti kulkee Etelä-Suomen eri maakuntien läpi, mutta osa linjastosta sijaitsee myös Pirkanmaalla. Siirtoverkosto yhdistyy Baltian maihin Balticconnector-kaasuputken avulla, joka kulkee Suomenlahden pohjassa Inkoon, sekä Viron Paldiskin välillä. Suomen maakaasun siirtoverkosto on yhdistetty Venäjän siirtoverkostoon Imatralle. [34] Maailmanlaajuisesti käytössä olevaa maakaasun siirtoverkostoa on noin miljoona

kilometriä. [35]

Metaanipohjaisia polttoaineita voidaan myös kuljettaa nestemäisessä muodossa, mikä mahdollistaa niiden käytön alueilla, joilla kaasuputkistoja ei ole saatavilla. Isompia määriä nestemäistä metaania tai maakaasua kuljetetaan tyypillisesti meriteitse LNG-säiliöaluksilla. Näiden alusten kapasiteetti vaihtelee, mutta suuremmat säiliöalukset pystyvät kuljettamaan noin 120 000–260 000 m³ LNG:tä. [36] Säiliöalukset tarvitsevat kuitenkin erityisen LNG terminaalien, johon aluksen lasti voidaan purkaa. LNG maatermiinaaleja löytyy Suomesta muun muassa Haminasta, Torniossa, sekä Porissa. Inkoosta löytyy myös LNG-terminaalilaiva, jossa voidaan säilyttää LNG:tä, sekä höyrystää sitä uudelleen kaasuksi. Näistä terminaalista Hamina ja Inkoo ovat yhdistetty maakaasu siirtoverkostoon. [37] LNG terminaalien voidaan lisäksi käyttää polttoaineen bunkrauksessa aluksille, jotka käyttävät nesteytettyä maakaasua voimanlähteenään.

Lyhyempiä matkoja ja pienempiä määriä varten nestemäistä metaania ja maakaasua voidaan siirtää käyttäen säiliöautoja. [38]

LNG:n varastointi on melko haasteellista, sillä se vaatii noin -163 °C varastointilämpötilan säilyttääkseen nestemäisen tilansa. Näin ollen se on varastoitava eristetyissä kryosäiliöissä, jotka jatkuvasti jäähdyttävät LNG:tä ja pitävät sen lämpötilan alle kiehumispisteen. Varastoinnin aikana osa nesteytystä maakaasusta voi kuitenkin kaasuuntua, mikä saattaa johtaa hajapäästöihin. Nämä päästöt pääsevät ilmakehään muun muassa venttiilien tai putkistojen liitoskohtien kautta. Kaasuuntuminen voi johtua esimerkiksi säiliön lämpötilan noususta, joka voi tapahtua eristyksen pettämisestä, jäähdytysjärjestelmän vikaantumisen tai ulkoisten lämpötilojen vaihtelun seurauksena. Tämän lisäksi erilaiset pumpit saattavat nostaa pumpatun LNG:n lämpötilaa johtaen kaasuuntumiseen. [39]

Hajapäästöjä syntyy myös LNG säiliöalusten purkaessa lastinsa terminaalien säiliöihin, mikä voi johtaa merkittäviin metaanipäästöihin ilmakehään ja tämä on tärkeä huomioida, kun tarkastellaan LNG ympäristövaikutuksia. [40]

Tekniset näkökulmat

Käyttö polttoaineena

LNG:n merkitys merenkulussa alkoi kasvamaan 2010-luvulla, ja viime vuosina sen rooli maailman kauppalaivastossa on kehittynyt entisestään. Yhä useammat laivanvarustamot ovat alkaneet investoida LNG-käyttöisiin aluksiin tai muuntaamaan olemassa olevia aluksia LNG:lle sopiviksi. Tästä johtuen LNG:n teknologia on jo edennyt pitkälle ja sille olevat käytännöt ja säädökset ovat kehittyneet huomattavasti. ^[41]

Kasvu on johtanut siihen, että LNG on nykyisin merenkulun suosituin vaihtoehtoinen polttoaine, ja sen suosion ennustetaan jatkuvan kasvavana trendinä. Tämä ilmenee selkeästi myös muun muassa telakoiden tilauskirjoissa. Heinäkuussa 2023 tilauksissa olevien alusten määrä oli 5 252, joista 1 376 olivat aluksia, jotka

käyttävät vaihtoehtoisia polttoaineita ja näistä aluksista 829 oli LNG-aluksia. Tämänhetkistä aluksista noin 1 % käyttää LNG:tä voimanlähteenä. ^[42]

LNG:n kasvu viime vuosikymmenen aikana näkyy myös LNG bunkrausalueiden määrän kasvussa sillä 2013 kyseisiä aluksia oli alle 5 kappaletta koko maailmassa, kun taas 2023 näitä aluksia oli jo 35. ^[43]

Nopea kasvu merenkulussa selittyy sillä, että LNG:llä monia päästöjä voidaan merkittävästi vähentää verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. Erityisesti NOx-, SOx- ja pienhiukkaspäästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin perinteisten fossiilisten polttoaineiden. Lisäksi maakaasun tuotanto on lähes kaksinkertaistunut viimeisen 25 vuoden aikana, joka selittää myös osittain sen laajempaa

käyttöä eri käyttökohteissa. ^[44]

LNG:n korkean teknologisen maturiteetin ansiosta käytännössä kaikilta suurimmilta laivamoottorivalmistajilta löytyy LNG polttomoottoreita. Suomalainen Wärtsilä on kuitenkin kulkenut LNG-polttomoottoreiden kehityksen eturintamassa. Erityisen merkittävä projekti tässä suhteessa oli Bit Viking tankkerin muuntaminen LNG-käyttöiseksi vuonna 2011. Kyseessä oli ensimmäinen kerta, kun raskaan polttoöljyn käyttö korvattiin LNG:llä merenkulkualuksessa. ^[45]

On hyvä huomioida, että LNG:tä voidaan myös käyttää poltto-kannoissa, mutta tämä teknologia edellyttää vielä kehitystyötä ja investointeja ennen kuin siitä voi tulla laajemmin käytetty vaihtoehto.



Ympäristö näkökulmat



LNG:n käytöllä merenkulussa on joitakin ympäristöetuja verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. LNG tuottaa esimerkiksi noin 90 % vähemmän NOx-päästöjä kuin perinteiset polttoaineet. LNG ei myöskään tuota juuri lainkaan SOx- tai pienhiukkaspäästöjä. ^[46] On kuitenkin tärkeää huomioida, että kasvihuonekaasupäästöjen kannalta on merkittävä ero siinä, käytetäänkö laivoissa LNG:tä vai vihreämpiä vaihtoehtoja, kuten bio-LNG:tä tai e-LNG:tä. Tämä johtuu siitä, että maakaasun tuotanto synnyttää paljon kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäksi tuotannosta voi aiheutua lukuisia muita ympäristö ongelmia riippuen itse porausmenetelmistä, tuotantoprosesseista ja päästöjen hallinnasta. ^[47]

Kasvihuonekaasupäästöt

LNG:n aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä on paljon ristiriitaista tietoa liikkeellä. Monet yritykset muun muassa mainostavat, että LNG:n käyttö synnyttää vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin perinteiset polttoaineet, mikä pitää paikkansa, mutta on tärkeää tarkastella kokonaispäästöjä ja niiden vaikutuksia ilmastoon. Metaanipäästöt, jotka liittyvät LNG:n tuotantoon, kuljetukseen ja käyttöön, vähentävät tämän polttoaineen ympäristöystävällisyyttä, sillä metaani on voimakas kasvihuonekaasu. Hiilidioksidiin verrattuna metaani on 20 vuoden aikavälillä noin

80 kertaa ja 100 vuoden aikavälillä noin 30 kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu. ^[48]

Metaanihajapäästöjä syntyy maakaasun tuotannon eri vaiheissa, ja niiden tarkkailu on tyypillisesti maakaasun tuotajien vastuulla. Tämä tarkoittaa, että kaikkia vuotoja ei välttämättä raportoida heti tai lainkaan, sillä näillä yrityksillä voi olla taloudellisia kannustimia minimoida raportoidut päästöt. Esimerkiksi vuonna 2023 Yhdysvaltalainen maakaasun tuottaja Philips 66 ei raportoinut maakaasu vuodosta ja vuoto tuli vasta laajemmin ilmi, kun ulkopuoliset tutkijat julkaisivat kuvia, jotka olivat otettu kansainvälisen avaruus aseman mittauslaitteilla. ^[49]

Hajapäästöjen lisäksi yksi LNG:n käytön yleisistä ongelmista aluksissa on palamattoman polttoaineen poistuminen ilmakehään savukaasujen mukana. Tätä ilmiötä kutsutaan yleisesti nimellä "methane slip". IMO ja EU ovat asettaneet LNG alusten palamattoman metaanin oletusarvoiksi 3,5 % ja 3,1 %, mutta ICCT:n tuoreessa tutkimuksessa, jossa mitattiin laivojen savukaasuista metaanin määrää, havaittiin sen olevan keskimäärin yli 6 %. ^[50] Euroopalainen järjestö Transport & Environment arvioi vuonna 2016, että LNG alukset, joiden "methane slip" on 3,5 %, tuottaisi noin 0,3–9,0 % enemmän

elinkaaripäästöjä kuin alukset, jotka käyttävät MGO:ta tai raskasta polttoöljyä. ^[51] ICCT:n tutkimuksessa suositeltiin päätäjille, että oletusarvoja nostettaisiin vastaamaan todellisia arvoja, jotta LNG:tä voidaan totuudenmukaisemmin tarkastella vaihtoehtoisena tulevaisuuden polttoaineena. ^[52]

ICCT julkaisi myös vuonna 2020 tutkimuksen, jossa todettiin, että LNG:n käyttö aluksissa ei edistä ilmastomuutoksen torjuntaa pääasiassa sen hajapäästöjen ja methane slip-ilmiön vuoksi. Tutkimuksessa korostettiin sitä, että LNG:n käyttö ei tue IMO:n asettamia tavoitteita kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä ja lyhyellä aikavälillä LNG:n käyttö saattaa itse asiassa pahentaa ilmastomuutosta verrattuna perinteisiin fossiiliin polttoaineisiin. ^[53]

Bio- ja e-LNG:n käyttö sen sijaan voi osaltaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna perinteisiin polttoaineisiin, koska niiden tuotannosta aiheutuu merkittävästi vähemmän päästöjä. Lisäksi esimerkiksi lannan käyttäminen bio-LNG:n tuotannossa vähentää päästöjä, joita syntyisi, jos lanta jäisi maatumaan luonnollisesti. Tämän tyyppiset vaihtoehdot tarjoavat kestävämpiä ratkaisuja, jotka voivat auttaa vähentämään merenkulun ympäristövaikutuksia pitkällä aikavälillä. ^[54]

Yhteenveto

LNG on tällä hetkellä laajimmin käytetty vaihtoehtoinen polttoaine merenkulussa. Suurin osa käytetystä LNG:stä on fossiilipohjaista jonka valmistus ja käyttö tuottaa runsaasti kasvihuonekaasupäästöjä. LNG:n aiheuttamien elinkaaripäästöjen suuruuteen vaikuttaa erityisesti hajapäästöt, joita syntyy LNG:n tuotannon, siirron, säilytyksen, sekä alusten bunkrausten yhteydessä. Merkittävä päästölähde on myös palamattoman metaanin vapautuminen laivojen polttomoottoreista ilmakehään. Näiden päästöjen määrää pyritään kuitenkin kokoajan vähentää, jotta LNG:n käytös-

tä aiheutuvat ympäristövaikutukset saataisiin minimoitua. Hajapäästöjä vähennetään esimerkiksi uusimalla tai kunnostamalla vuotavia maakaasunsiirtoverkostoja, sekä lisäämällä vuotojen havaitsemisjärjestelmiä. Palamatoman metaanin syntymistä sen sijaan pyritään estää tutkimalla ja kehittämällä laivojen moottori ja savukaasujen käsittely tekniikkaa. Kehitystyötä tehdään erityisesti palamisprosessien parantamiseen, palotilojen optimointiin ja palokaasujen käsittelyyn.

Mikäli hajapäästöjä ja palamattoman metaanin määrää saadaan merkittävästi vähen-

nettyä, LNG:n tulevaisuus vihreämmässä merenkulussa voi olla erittäin lupaava, sillä LNG:llä on useita etuja verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. LNG tuottaa muun muassa huomattavasti vähemmän SOx-, NOx- ja pienhiukkaspäästöjä kuin perinteiset fossiiliset polttoaineet. Lisäksi bio- ja e-LNG:n tuotanto, sekä käyttö lisääntyvät jatkuvasti, mikä tarjoaa entistä kestävämpiä vaihtoehtoja merenkulun energiatarpeisiin. Bio- ja e-LNG:n etuina voidaan huomioida se, että rakennettua maakaasun siirtoverkostoa voidaan hyödyntää myös näiden vihreiden polttoaineiden siirrossa.

Vahvuudet

- + LNG on jo laajalti käytössä merenkulussa, mikä parantaa bunkrausmahdollisuuksia ja tarkoittaa, että sen turvalliseen käyttöön on olemassa vakiintuneet peruskäytännöt
- + Bio- ja e-LNG:tä pystytään valmistaa hyvin pienellä hiilijalanjäljellä
- + Energiatiheys parempi kuin monen muun uuden polttoaineet
- + Bio- ja e-LNG:tä voidaan suoraan syöttää maakaasun siirtoverkostoon ja käyttää LNG:llä toimivissa aluksissa
- + Maakaasulla on jo paljon rakennettua infrastruktuuria
- + Ei aiheuta myrkytysvaaraa ihmisille
- + Vuodoista aiheutuvat ongelmat lähiympäristön ekosysteemeihin suhteellisen pieniä verrattuna joihinkin muihin polttoaineisiin

Heikkoudet

- LNG aiheuttaa elinkaarensa aikana paljon metaanipäästöjä hajapäästöjen ja palamatoman polttoaineen vaikutuksesta
- Hiilipohjainen polttoaine, eli käytöstä syntyy hiilidioksidipäästöjä
- Suurin osa tämänhetkisistä LNG:stä on fossiilipohjaista
- Varastoitava erittäin matalissa lämpötiloissa
- Energiatiheys heikempi kuin fossiilisten polttoaineiden
- Sinisen LNG:n valmistus saattaa lisätä öljyntuotannon määrää
- Bio- ja e-LNG:n saatavuuteen voi vaikuttaa myös muiden alojen tarve näille polttoaineille

Lähteet

- [1] DNV. (2023). Energy transition outlook 2023: Maritime forecast to 2050. (s. 24). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/download-the-report/>
- [2] DNV. (n.d.). LNG as marine fuel. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/environmental-performance/>
- [3] Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel. (s. 1-2). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel,%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf
- [4] Lam, J. S. L., Piga, B., & Zengqi, X. (2022). Role of bio-LNG in shipping industry decarbonisation. (s. 13-14). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/10/Sea-LNG-Role-of-bio-LNG-in-shipping-industry-decarbonisation-2022_10.pdf
- [5] Macdonald, F., & Martin, D. (n.d.). The maritime alternative fuels barometer: Understanding the maritime industry's pathway to a net-zero future. (s. 29). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://thetius.com/wp-content/uploads/2024/01/Thetius-Maritime-Alternative-Fuels-Barometer.pdf>
- [6] Department of Energy. (n.d.). Conventional Natural Gas Production. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://afdc.energy.gov/fuels/natural-gas-conventional>
- [7] Sotoodeh, K. (2021). Fugitive emissions from piping and valves. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323918626000022>
- [8] Younes, L., & Bittle, J. (2023). 'Death stars on sinking land': How liquefied natural gas took over the Gulf Coast. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://grist.org/energy/louisiana-liquefied-natural-gas-terminal-lng-gulf-coast/>
- [9] Osaka, S. (2023). Companies capture a lot of CO2. Most of it is going into new oil. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.washingtonpost.com/climate-environment/2023/10/25/enhanced-oil-recovery-carbon-capture/>
- [10] Nelissen, D., Faber, J., van der Veen, R., van Grinsven, A., Shanthi, H., & van den Toorn, E. (2020). Availability and costs of liquefied bio- and synthetic methane: The maritime shipping perspective. (s. 5). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/CE_Delft_190236_Availability_and_costs_of_liquefied_bio-_and_synthetic_methane_Def.pdf
- [11] International Energy Agency. (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. (s. 13-15). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf
- [12] International Energy Agency. (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. (s. 13-15). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf

Lähteet

- [13] International Energy Agency. (n.d.). An introduction to biogas and biomethane. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth/an-introduction-to-biogas-and-biomethane>
- [14] SEA-LNG. (n.d.). Liquefied e-methane fact sheet. Haettu 10.09.2024 osoitteesta: https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2024/06/24-06-07_Liquefied_E-methane_Fact_Sheet_May24_FINAL100.pdf
- [15] Q Power. (n.d.). Teknologia: Biokatalyyttinen metanointi. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://qpower.fi/fi/teknologia/>
- [16] Bertagna, S., Kouznetsov, I., Braidotti, L., Marino, A., & Bucci, V. (2023). A Rational Approach to the Ecological Transition in the Cruise Market: Technologies and Design Compromises for the Fuel Switch. (s. 4). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/366818830_A_Rational_Approach_to_the_Ecological_Transition_in_the_Cruise_Market_Technologies_and_Design_Compromises_for_the_Fuel_Switch
- [17] Chorowski, M., Duda, P., Polinski, J., & Skrzypacz, J. (2015). LNG systems for natural gas propelled ships. (s. 1). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/101/1/012089/pdf>
- [18] Cotta, W. K., Haugh, W. A., & Franklin, L. (n.d.). Liquefied Natural Gas as Fuel Design Considerations. (s. 3). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/DCO%20Documents/5p/LGCNCOE/docs/LNGF-DesignConsiderations.pdf?ver=2019-09-11-142443-480>
- [19] Cotta, W. K., Haugh, W. A., & Franklin, L. (n.d.). Liquefied Natural Gas as Fuel Design Considerations. (s. 3-4). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/DCO%20Documents/5p/LGCNCOE/docs/LNGF-DesignConsiderations.pdf?ver=2019-09-11-142443-480>
- [20] Cotta, W. K., Haugh, W. A., & Franklin, L. (n.d.). Liquefied Natural Gas as Fuel Design Considerations. (s. 3). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dco.uscg.mil/Portals/9/DCO%20Documents/5p/LGCNCOE/docs/LNGF-DesignConsiderations.pdf?ver=2019-09-11-142443-480>
- [21] International Gas Union. (2023). 2023 World LNG report. (s. 7, 21-22). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://igu.org/resources/lng2023-world-lng-report/>
- [22] Statista. (2023). Nominal natural gas liquefaction capacity worldwide in selected years from 2010 to 2022. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.statista.com/statistics/881905/nominal-liquefaction-capacity-of-natural-gas-worldwide/>
- [23] Shell. (2023). LNG Outlook 2023. (s. 12). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas/liquefied-natural-gas-lng/lng-outlook-2023/jcr_content/root/main/section_599628081_co/promo_copy_copy/links/item0.stream/1676487838925/410880176bce66136fc24a70866f941295eb70e7/lng-outlook-2023.pdf

Lähteet

- [24] Rashad, M., Chow, E., & Bouso, R. (2024). Shell expects 50% rise in global LNG demand by 2040. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.reuters.com/business/energy/global-lng-demand-seen-rising-more-than-50-by-2040-shell-report-2024-02-14/>
- [25] Cedigaz. (2023). Global biomethane market 2023 assessment – From ambition to action. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.cedigaz.org/global-biomethane-market-2023-assessment-from-ambition-to-action/>
- [26] European Biogas Association. (n.d.). Breaking Free of the Energy Dependency Trap – Delivering 35 bcm of biomethane by 2030. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.european-biogas.eu/breaking-free-of-the-energy-dependency-trap-delivering-35-bcm-of-biomethane-by-2030/>
- [27] Statista. (2023). Natural gas consumption in the European Union from 1998 to 2022. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.statista.com/statistics/265406/natural-gas-consumption-in-the-eu-in-cubic-meters/>
- [28] Comer, B., O'Malley, J., Osipova, L., & Pavlenko, N. (2022). Comparing the future demand for, supply of, and life-cycle emissions from, bio, synthetic, and fossil LNG marine fuels in the European Union. (s. 6). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/Renewable-LNG-Europe_report_FINAL.pdf
- [29] Vanhanen, J., Pulkkinen, A., Salmi, W., Beniard, M., Järvinen, K., & Lehtomäki, J. (2022). Meriliikenteen vaihtoehtoisten polttoaineiden markkinoiden kehitys ja vaikutukset Suomeen suuntautuvan meriliikenteen kustannuksiin. (s. 30). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164405/LVM_2022_13.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [30] Biokaasu 2030. (n.d.). Kotimaista biokaasun tuotantoa voidaan kasvattaa merkittävästi, sillä hyödyntämätöntä syötepotentiaalia on paljon. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://biokaasu2030.fi/>
- [31] Aluehallintovirasto. (2021). Päätös: Porin biokonversiolaitoksen ympäristölupa ja toiminnan aloittamislupa, Pori. (s. 11, 17). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: [https://pori.cloudnc.fi/fi-FI/Toimielimet/Kaupunginhallitus/Kokous_1712022/Lausuntopyynto_BioEnergo_Oy_biokonversio\(78405\)](https://pori.cloudnc.fi/fi-FI/Toimielimet/Kaupunginhallitus/Kokous_1712022/Lausuntopyynto_BioEnergo_Oy_biokonversio(78405))
- [32] Elinkeno-, liikenne- ja ympäristökeskus. (2021). Päätös ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (YVA) soveltamisesta yksittäistapauksessa, vihreän vedyn tuotantolaitos, Harjavalta. (s. 2-3). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/P2X%20Solutions%20Oy%2C%20vihre%C3%A4n%20vedyn%20tuotantolaitos%2C%20Harjavalta.pdf>
- [33] Mattila, T. (n.d.). Suomen LNG verkosto. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.kaasuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2018/12/Suomen-LNG-terminaali-alkaa-muotoutua-Tommy-Mattila.pdf>

Lähteet

- [34] Gasgrid. (n.d.). Kaasun siirtoverkosto. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://gasgrid.fi/kaas-uverkosto/kaasun-siirtoverkosto/>
- [35] Intrenational Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023. (s. 110). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb9d5903-0df2-4c6c-afa1-4012f9ed45d2/GlobalHydrogenReview2023.pdf>
- [36] Clarksons. (n.d.). What is an LNG ship? Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.clarksons.com/glossary/what-is-an-lng-ship/>
- [37] Energiategollisuus. (n.d.). Ajankohtaista kaasumarkkinoista. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://energia.fi/energiapolitiikka/ajankohtaista-kaasumarkkinoista/>
- [38] CIMC ENRIC. (n.d.). LNG Tanker Truck. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.cimc-enric.com/cimc-enric-tag/lng-tanker-truck.html>
- [39] The American Petroleum Institute. (2015). Liquefied Natural Gas (LNG) Operations: Consistent Methodology for Estimating Greenhouse Gas Emissions. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.api.org/~media/files/ehs/climate-change/api-lng-ghg-emissions-guide-lines-05-2015.pdf>
- [40] Comer, B., Beecken, J., Vermeulen, R., Sturup, E., Paschinger, P., Osipova, L., Gore, K., Delahaye, E., Verhagen, V., Knudsen, B., Knudsen, J., & Verbeek, R. (2024). Fugitive and unburned methane emissions from ships (FUMES). (s. IV). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-64-%E2%80%93-FUMES-ships-Report-A4-60037-FV.pdf>
- [41] Wärtsilä. (2017). LNG - A future fuel for the maritime industry? Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.wartsila.com/insights/article/lng-a-future-fuel-for-the-maritime-industry>
- [42] DNV. (2023). Energy transition outlook 2023: Maritime forecast to 2050. (s. 24). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/download-the-report/>
- [43] International Gas Union. (2023). 2023 World LNG report. (s. 102-103). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://igu.org/resources/lng2023-world-lng-report/>
- [44] Statista. (2024). Natural gas production worldwide from 1998 to 2023. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.statista.com/statistics/265344/total-global-natural-gas-production-since-1998/>
- [45] Wärtsilä. (2017). Bit Viking. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.wartsila.com/insights/case-study/bit-viking>
- [46] Aakko-Saksa, P., & Lehtoranta, K. (2019). Ship emissions in the future. (s. 1). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24205607/VTT_R_00335_19.pdf

Lähteet

- [47] U.S. Energy Information Administration. (2024). Natural gas explained. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/natural-gas-and-the-environment.php>
- [48] Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. (s. 1017). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf
- [49] Clark, A., & Mider, Z. (2023). Phillips 66 Failed to Report Big Gas Release Spotted From Space. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://financialpost.com/pmnbusiness/pmnbusiness-phillips-66-failed-to-report-big-gas-release-spotted-from-space?utm_source=ground.news&utm_medium=referral
- [50] Comer, B., Beecken, J., Vermeulen, R., Sturup, E., Paschinger, P., Osipova, L., Gore, K., Delahaye, E., Verhagen, V., Knudsen, B., Knudsen, J., & Verbeek, R. (2024). Fugitive and unburned methane emissions from ships (FUMES). (s. I-V). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-64-%E2%80%93-FUMES-ships-Report-A4-60037-FV.pdf>
- [51] European Federation for Transport and Environment. (2016). Natural gas in ships: Costs/benefits of LNG versus conventional fossil fuels. (s. 1). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://te-cdn.ams3.digitaloceanspaces.com/files/2015_02_TE_briefing_natural_gas_shipping_FINAL.pdf
- [52] Comer, B., Beecken, J., Vermeulen, R., Sturup, E., Paschinger, P., Osipova, L., Gore, K., Delahaye, E., Verhagen, V., Knudsen, B., Knudsen, J., & Verbeek, R. (2024). Fugitive and unburned methane emissions from ships (FUMES). (s. I-V). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-64-%E2%80%93-FUMES-ships-Report-A4-60037-FV.pdf>
- [53] Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., & Rutherford, D. (2020). The climate implications of using LNG as a marine fuel. (s. 1). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel,%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf
- [54] Lam, J. S. L., Piga, B., & Zengqi, X. (2022). Role of bio-LNG in shipping industry decarbonisation. (s. 13). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/10/Sea-LNG-Role-of-bio-LNG-in-shipping-industry-decarbonisation-2022_10.pdf

Kaavioiden, kuvioiden ja taulukoiden lähteet

s.2

Kuvio 1:

DNV. (2023). Energy transition outlook 2023: Maritime forecast to 2050. (s. 24). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/download-the-report/>

s.3-5

Kuvio 2:

International Energy Agency. (2020). Outlook for biogas and biomethane: Prospects for organic growth. (s. 5). Haettu 19.06.2024 osoitteesta: https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf

U.S. Energy Information Administration. (2023). Natural gas explained. Haettu 19.06.2024 osoitteesta: <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/delivery-and-storage.php>

s.6

Taulukko:

Solakivi, T., Paimander, A., & Ojala, L. (2022). Cost competitiveness of alternative maritime fuels in the new regulatory framework. (s. 2). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.utupub.fi/bitstream/handle/10024/173681/1-s2.0-S1361920922003261-main.pdf?sequence=1>

Bertagna, S., Kouznetsov, I., Braidotti, L., Marino, A., & Bucci, V. (2023). A Rational Approach to the Ecological Transition in the Cruise Market: Technologies and Design Compromises for the Fuel Switch. (s. 4). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/366818830_A_Rational_Approach_to_the_Ecological_Transition_in_the_Cruise_Market_Technologies_and_Design_Compromises_for_the_Fuel_Switch

Xing, H., Stuart, C., Spence, S., & Chen, H. (2021). Alternative fuel options for low carbon maritime transportation: Pathways to 2050. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621008714?via%3Dihub>

Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. (2021). Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621030675?via%3Dihub>

The Engineering ToolBox. (n.d.). Fuels - Higher and Lower Calorific Values. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

European Commission. (2021). Regulation of the European Parliament and of the Council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. (Annex II). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A52021PC0562>

Kaavioiden, kuvioiden ja taulukoiden lähteet

s.6

Taulukko:

Hürpekli, M., & Özsezen, A. N. (2023). Determination of combustion and emission characteristics of liquid Fischer-Tropsch diesel fuel synthesized from coal in a diesel engine. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006970>

Nair, A. (2016). Alternative Fuels for Shipping: Potential for reductions in CO2 emissions, Financial viability for ship owners and, Optimised fleet mix design for policymakers. (s 26). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://thesis.eur.nl/pub/41180/A.-Nair-Thesis-Final-441409-A.Nair.pdf&ved=2ahUKEwigvu_mga6HAXWBFBAIHcUxDfcQFnoECBYQAQ&usq=AOvVaw-2gONDv_4o4A7a8ZhjFtsD-

Kuvien lähteet

- s.1** Adobe Stock: Federico Aliaksandr Siamko. (n.d.). Haettu 30.08.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/container-cargo-ship-in-the-ocean-at-sunset-blue-sky-back-ground-with-copy-space-nautical-vessel-and-sea-freight-shipping-international-global-business-logistics-transportation-import-export-concept/756026306>
- s.2** Adobe Stock: Yellow Boat. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/aerial-top-view-of-cargo-ship-carrying-container-and-running-for-export-goods-from-cargo-yard-port-to-custom-ocean-concept-technology-transportation-customs-clearance/483855922>
- s.3** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- s.4** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- s.5** Adobe Stock: PNG Lover. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/oil-refinery-plant-isolated-on-transparent-background/763105869?asset_id=763105869
- s.6** Adobe Stock: bsd studio. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/preventing-workplace-injury-concept-icons-set-occupational-health-and-safety-idea-thin-line-color-illustrations-isolated-symbols-editable-stroke-roboto-medium-myriad-pro-bold-fonts-used/551487228?asset_id=551487228
- s.7** Adobe Stock: Icon-Duck. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/lean-manufacturing-banner-vector-illustration-with-the-icons-of-six-sigma-management-quality-standard-industry-continuous-improvements-reduce-waste-improve-productivity-efficiency-keizen/672171945?asset_id=672171945
- s.8** Adobe Stock: Gondex. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/continuous-line-drawing-of-machine-gears-the-concept-of-gears-on-a-single-line-style-machine-machine-gear-technology-concept-in-single-line-doodle-style/566081642?asset_id=566081642
- s.9** Adobe Stock: Gondex. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/continuous-line-drawing-of-machine-gears-the-concept-of-gears-on-a-single-line-style-machine-machine-gear-technology-concept-in-single-line-doodle-style/566081642?asset_id=566081642
- Adobe Stock: aerial-drone. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/493941813>
- s.10** Adobe Stock: The Deep Designer. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/638437077?asset_id=638437077

Kuvien lähteet

s.2-20 Adobe Stock: Steves Artworks. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/blue-watercolor-sea-wave-texture-design-on-transparent-background/773410060?asset_id=773410060

