

UUPO – Merilogistiikan uudet polttoaineet vihreän
siirtymän ja sinisen kasvun vauhdittajina

Polttoaine Tietopaketti: Ammoniakki



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu



SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta

2024

Perustietoa

Ammoniakki

Ammoniakki (NH₃) on hiilivapaa yhdiste, joka koostuu yhdestä typpi atomista ja kolmesta vedyn atomista. Normaaliämpötilassa ja -paineessa ammoniakki on väritön, myrkyllinen ja syövyttävä kaasu, jolla on pistävä haju.

Ammoniakkia on valmistettu teollisessa mittakaavassa jo yli sadan vuoden ajan, minkä ansiosta sen tuotanto, sekä siihen liittyvä tekniikka ja käytännöt ovat kehittyneet erittäin korkealle tasolle. [1] Tällä hetkellä noin 80 % kaikesta tuotetusta ammoniakista käytetään lannoitteiden valmistukseen. [2]

Hiilivapauden ansioista ammoniakin poltto ei tuota lainkaan hiilidioksidia ja optimaalisissa olosuhteissa palamisreaktion lopputuotteina syntyy vain typpeä ja vettä. Tämän vaikutuksesta se nähdään meren-

kulussa yhtenä potentiaalisena korvaajana perinteisille polttoaineille. Vaikka ammoniakin käyttö polttoaineena on herättänyt kasvavaa kiinnostusta ja aiheesta on tehty paljon kehitystyötä, ammoniakilla toimivia aluksia ei vielä löydy meriltä. Käyttöönottoa ovat vaikeuttaneet merenkulussa muun muassa ammoniakin myrkyllisyys, saatavuus, sekä polttoainejakelun infrastruktuurin puute. [3]

Erilaisia ammoniakki testiajoja on kuitenkin jo suoritettu erityyppisissä aluksissa ja näillä näkymin maailman ensimmäinen ammoniakilla toimiva konttialus otetaan käyttöön Norjassa 2026. [4] Tämä merkittävä edistysaskel osoittaa, että teknologiset ja logistiset haasteet ovat vähitellen ylitettävissä, ja ammoniakista voi tulla varteenotettava polttoaine vaihtoehto merenkulussa.

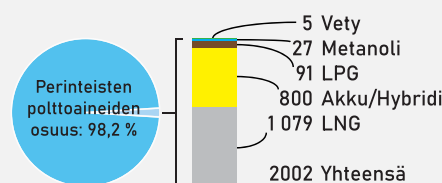
Tärkeitä näkökohdat:

1. Ammoniakin käyttö ei tuota lainkaan hiilidioksidia, mutta epätäydellinen palaminen polttomoottoreissa voi tuottaa mm. dityppioksidia, joka on huomattavasti voimakkaampi kasvihuonekaasu
2. Ammoniakki ei ole vielä käytössä merenkulussa
3. Ammoniakki on erittäin myrkyllistä ihmiselle, eliölle ja ekosysteemeille, joka tekee sen käytöstä haasteellista
4. Ammoniakkia voidaan käyttää polttoaineena monella eri tavalla
5. Ammoniakki tuottaa huomattavasti vähemmän SOx- ja pienhiukkaspäästöjä kuin perinteiset polttoaineet

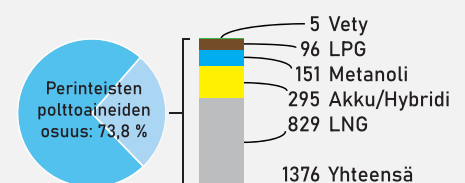
Kuvio 1. Maailman laivaston vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöönotto alusten määrän mukaan (yläosa) ja bruttovetoisuuden mukaan (alaosa), heinäkuu 2023

Alusten määrä

Käytössä olevat alukset

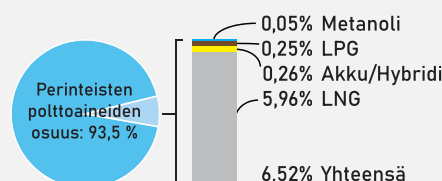


Tilauksessa olevat alukset

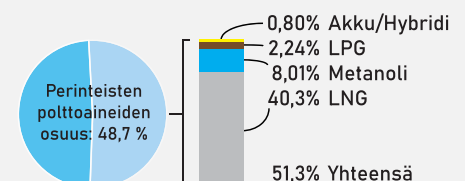


Bruttovetoisuus

Käytössä olevat alukset



Tilauksessa olevat alukset



Valmistusmenetelmät



Lähes kaikki ammoniakki valmistetaan Haber–Bosch-menetelmällä. Kyseisessä menetelmässä vety ja typpi syötetään reaktoriin, jossa ne reagoivat keskenään rautapohjaisen katalyytin, sekä korkean paineen ja lämpötilan vaikutuksesta muodostaen ammoniakkia. Haber–Bosch-menetelmän lisäksi ammoniakkia voidaan valmistaa muillakin tavoilla kuten elektrolyysiprosessilla, joka tunnetaan myös nimellä elektrokemiallinen synteesi. [5] Monen muun uuden polttoaineen tavoin, ammoniakki luokitellaan eri väreihin riippuen siitä, miten prosessissa

käytetty vety on tuotettu. [6]

Ruskea ammoniakki

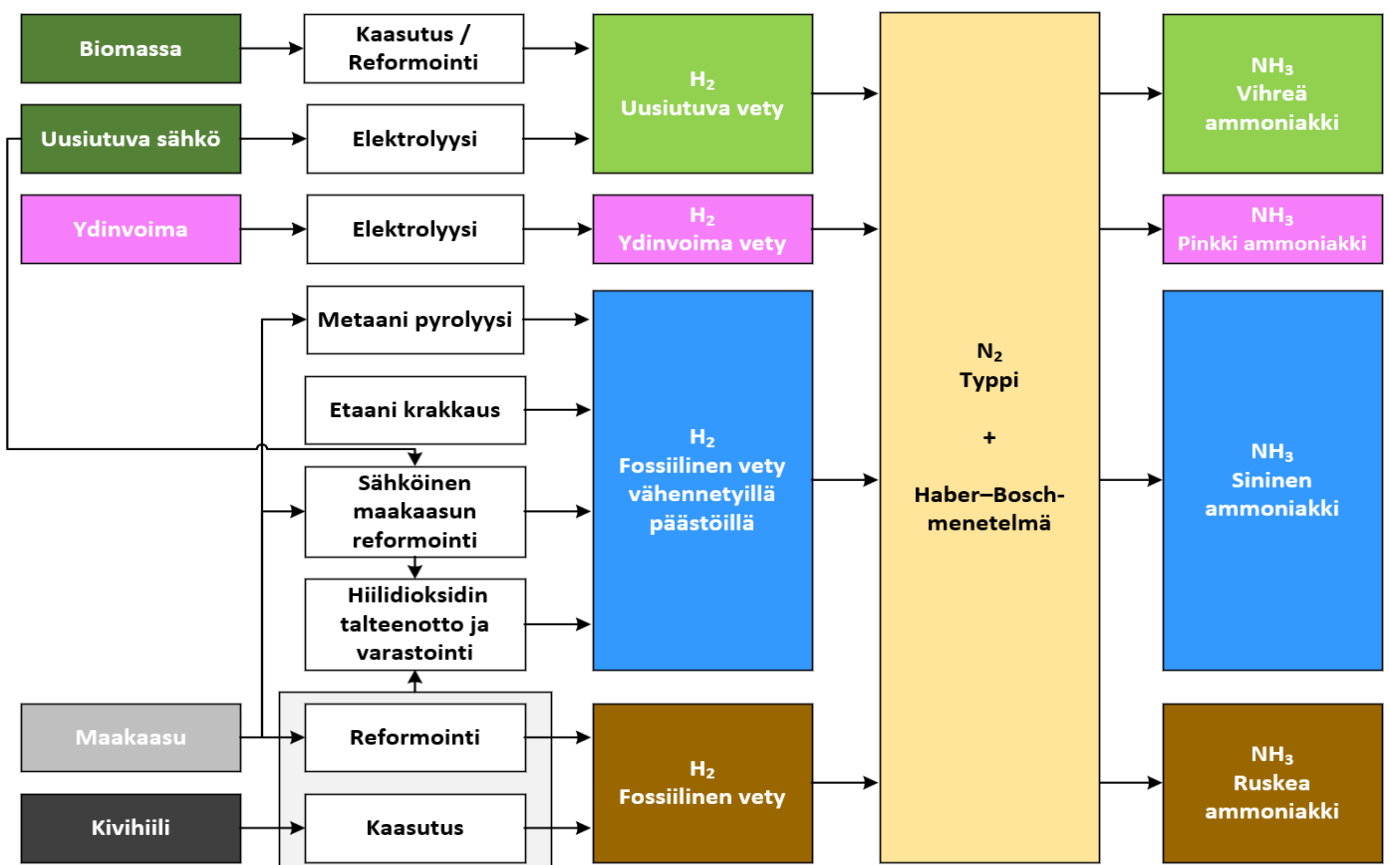
Ruskean ammoniakin valmistuksessa käytetty vety on tuotettu fossiilisista raaka-aineista, mikä johtaa korkeisiin elinkaaripäästöihin. Päästöjen määrä riippuu kuitenkin käytetystä fossiilisesta raaka-aineesta. Esimerkiksi mustan ammoniakin tuotanto, jossa vety on peräisin kivihiilestä, tuottaa lähes kaksi kertaa enemmän elinkaari-päästöjä kuin harmaa ammoniakki, jonka vety on sen sijaan tuotettu maakaasusta. Yli 90 % ammoniakin tuotannosta tapahtuu hyödyntäen fossiilisia

raaka-aineita. [7]

Sininen ammoniakki

Sinistä ammoniakkia tuotetaan pääsääntöisesti samanlaisilla prosesseilla kuin ruskeaa ammoniakkia, mutta suurin osa syntyvistä kasvihuonekaasupäästöistä pyritään estämään pääsemästä ilmakehään erilaisilla teknologisilla ratkaisilla. Esimerkkejä tästä ovat muun muassa hiilidioksidin talteenotto, missä syntyneet päästöt otetaan talteen ja loppusijoitetaan geologisiin varastoihin. Talteen otettu hiilidioksidi voidaan myös hyötyä käyttäen erilaisissa prosesseissa kuten syn-

Kuvio 2. Ammoniakin valmistuksen päämenetelmät



Valmistusmenetelmät



teettisten polttoaineiden valmistuksessa. [8] Sinisen ammoniakkin vetyä voi tämän lisäksi tuottaa erilaisilla prosesseilla, jotka aiheuttavat vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä, kuten metaanin pyrolyysillä. Vetyä, jota tuotetaan kyseisellä prosessilla saatetaan myös kutsua turkoosiksi vedyksi. [9]

Vihreä ammoniakki

Vihreässä tai uusiutuvassa ammoniakissa vety tuotetaan menetelmillä, jotka synnyttävät vain vähän tai ei lainkaan kasvihuonekaasuja. Yleisimmät tavat tuottaa vihreää vetyä ovat elektrolyysi, sekä biomassan

kaasutus ja reformointi. [10]

Elektrolyysissä vetyä tuotetaan käyttämällä uusiutuvaa sähköä, veden hajottamiseen vedyksi ja hapeksi. Ongelmana prosessissa on elektrolyysin tarvitsema energiamäärä, sekä makean veden saatavuus. Nämä haasteet voivat vaikuttaa merkittävästi vihreän ammoniakkin kustannuksiin ja kasvuun, erityisesti alueilla, joilla uusiutuvan energian resurssit eivät ole runsaat ja makean veden saatavuus on rajoitettua. [11]

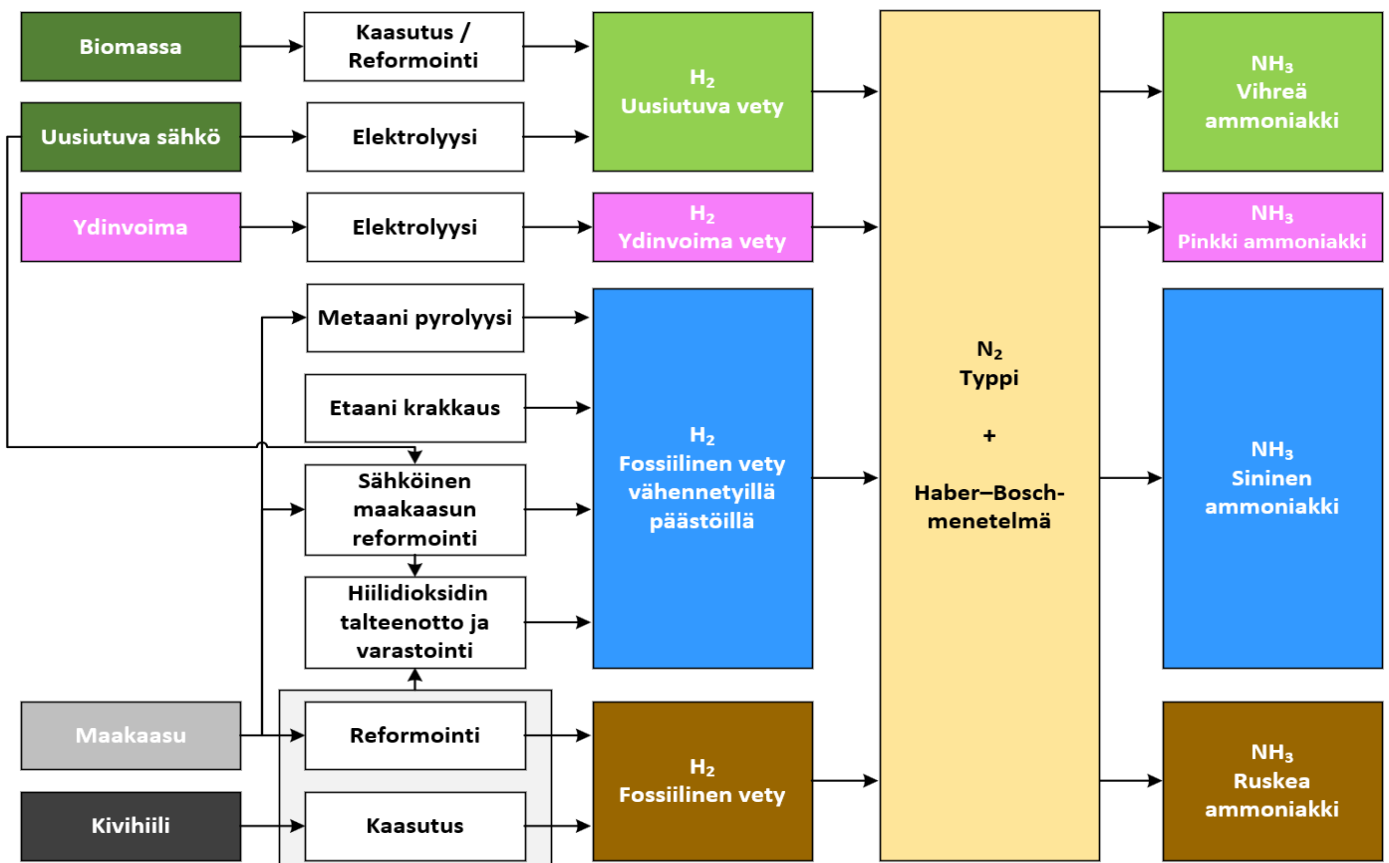
Biomassasta valmistettu vety sen sijaan valmistetaan kaasut-

tamalla biomassaa, eli sitä kuumennetaan korkeisiin lämpötiloihin jonka seurauksena syntyy synteetikaasua. Tämä synteetikaasu voidaan käsitellä, jolloin lopputuotteena saadaan vetyä. [12]

Pinkki ammoniakki

Pinkin ammoniakkin vetyä tuotetaan myös elektrolyysin avulla. Erona vihreässä ja pinkissä ammoniakissa on se, että vedyn tuotannossa energianlähteenä käytetään uusiutuvan sähkön sijasta ydinvoimalla tuotettua sähköä. [13]

Kuvio 2. Ammoniakin valmistuksen päämenetelmät



Ominaisuudet ja turvallisuus



Polttoaine ominaisuudet

Verrattuna perinteisiin fossiilisiin polttoaineisiin, nesteytetyllä ammoniakilla ($L NH_3$) on melko matala tehollinen lämpöarvo. Kun vertaillaan polttoaineiden energiatihelyksiä, ero ammoniakin ja perinteisten polttoaineiden välillä kasvaa entisestään, ammoniakin alhaisen tiheyden vaikutuksesta. Tästä johtuen ammoniakki tarvitsee noin kolmin kertaisen tilan saman energiamäärän varastointiin kuin raskas polttoöljy.

Ammoniakin syttyvyys ominaisuudet ovat myös melko heikot ja nämä tekevät sen käytöstä polttoaineena haasteellista. Ammoniakin erittäin korkean itsesyttymislämpötilan vaikutuksesta polttomoottoreiden polttokammioissa tarvitaan korkeita lämpötiloja ja paineita, mikä voi aiheuttaa ylimääräistä stressiä moottorille ja muille osille. Tämän takia ammoniakki polt-

tomoottoreissa saatetaan joskus käyttää matalamman itsesyttymislämpötilan omaavaa pilottipolttoainetta sytytysprosessin aloittamiseksi. Käytännössä tämä toimii siten, että polttokammiossa pilottipolttoaine syttyy ensiksi palamaan nousevan lämpötilan ja paineen vaikutuksesta ja tämän pilottipolttoaineen vapauttaman energian vaikutuksesta ammoniakki syttyy palamaan. Itse pilottipolttoaine ja sen osuus kokonaispolttoainemäärästä riippuu polttomoottori tyypistä. ^[14]

Tämän lisäksi ammoniakilla on alhainen liekkiintaman etene- misnopeus, sekä suhteellisen kapea syttymisraja, jotka tekevät sen käytöstä polttoaineena entistä hankalampaa. ^[15]

Turvallisuus

Ammoniakki kaasu on kevyempää kuin ilma, jonka vaikutuksesta se kohoaa ylöspäin ja

sisätiloissa pakkaantuu katon rajaan. Se kuitenkin reagoi herkästi ilmassa olevan kosteuden kanssa, jolloin ammoniakki- kaasun tiheys saattaa kasvaa korkeammaksi kuin ilman tiheys. Tämän seurauksena se laskeutuu lähelle maanpintaa valkoisena kaasuna. Tyypillisesti ammoniakivuotojen yhteydessä ilmaan ruiskutetaan vettä, joka sitoo ammoniakin itseensä estäen sen leviämisen vuotoalueesta kauemmas. ^[16]

Ihmisille ammoniakki on erittäin myrkyllistä ja pienetkin konsentraatiot voivat aiheuttaa altistumisoireita. Ammoniakki voi myös aiheuttaa kemiallisia palovammoja eri kehon osiin reagoimalla ruumiinnesteiden kanssa. Näiden vammojen syntymistä voidaan kuitenkin ehkäistä, mikäli ammoniakin kanssa kosketuksiin joutunut henkilö saadaan nopeasti pe- sutilaan tai hätäsuihkuun. ^[17]

Polttoaine	Energia ja säilytys					Syttyvyys		
	Tiheys [kg/m ³]	Tehollinen lämpöarvo (LHV) [MJ/kg]	Energia- tiheys [MJ/m ³]	Kiehumis- piste [°C]	Polttoaineen tilantarve vs LSHFO	Itsesyttymis- lämpötila ilmassa [°C]	Leimahdus- piste [°C]	Syttymis- rajat ilmassa [%]
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 NH₃	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

Ammoniakki on massaltaan maailman toiseksi eniten valmistettu kemikaali rikkihapon jälkeen ja sitä valmistettiin vuonna 2020 noin 183 Mt. Kyseisenä vuonna maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti oli noin 243 Mt. ^[18]

Ammoniakin tuotannosta syntyy noin 0,5 Gt hiilidioksidipäästöjä, joka vastaa lähes yhtä prosenttia kaikista vuosittaisista päästöistä. Päästöjen määrä selittyy osittain sillä, että esimerkiksi vuonna 2021 tuotetusta ammoniakista vain 0,02 Mt oli uusiutuvaa ammoniakia. Vihreän ammoniakin osuus odotetaan kasvavan kuitenkin nopeasti, sillä ilmoitettujen uusiutuvan ammoniakin laitosten vuosittainen tuotantokapasiteetti tulee nykyisten arvioiden mukaan olemaan 15 Mt vuonna 2030. ^[19]

Kun ammoniakin käyttö laajenee entisestään eri käyttötarkoituksiin, sen tuotanto ja kysyntä tulee kasvamaan nopeasti. Maailmanlaajuisen tuotannon odotetaan nousevan noin 700 miljoonaa tonniin vuoteen 2050 mennessä. ^[20] Joidenkin arvioiden mukaan tämä luku saattaa olla jopa lähemmäs 900 miljoonaa tonnia. ^[21]

Tulevaisuuden ratkaisuna saat-
taa olla, että ammoniakkia tuotetaan paikassa missä sitä käytetään eli se vastaisi hajutetun sähköntuotannon periaatteita. Tämä tarkoittaa esimerkiksi, että ammoniakki tuotettaisiin pienellä tuotantolaitoksella vaikkapa maatilalla tai laivassa missä se lopulta käytetään erilaisiin käyttötarkoituksiin. Tutkimusta tästä on muun muassa tehty Australias-
sa Melbournen Monash-yliopistossa. ^[22]

Tulevaisuuden näkymät Suomessa ja Satakunnassa

Vaikka ammoniakkia tuotetaan maailmanlaajuisesti isoja määriä, niin Suomessa tuotantolaitoksia ei vielä ole. Tähän saattaa kuitenkin tulla muutos, sillä toukokuussa vuonna 2023 YLE uutisoi Yhdysvaltalaisen Plug Power yrityksen suunnitelmista rakentaa Suomeen kolme vihreän vedyntuotantolaitosta Kokkolaan, Kristiinankaupunkiin ja Porvooseen. Kokkolan tuotantolaitoksessa tuotettaisiin myös ammoniakkia polttoaineeksi, sekä prosessiteollisuuden energianlähteeksi. Hankkeet ovat kuitenkin vielä suunnitteluvaiheessa ja

lopullinen investointipäätös tullaan tekemään vasta vuosien 2025–2026 aikana. ^[23]

Myös Satakunnan Kansa Länsi-Suomi uutisoi maaliskuussa vuonna 2024 Prizztechin ja Rejlersin selvityksestä, jossa nämä yritykset suunnittelivat ammoniakkitehtaan rakentamista Raumalle. Investoinnin arvo arvioitiin olevan noin 720 miljoonaa euroa ja kyseisen luokan tuotantolaitos tuottaisi noin 240 000 tonnia ammoniakkia vuodessa. Tuotettua ammoniakkia voitaisiin hyödyntää lähialueen teollisuudessa, kuten Uudenkaupungin lannoitetehtaalla, sekä Harjavallan nikkelin jalostuslaitoksella. Tämän lisäksi ammoniakkia voitaisiin helposti kuljettaa säiliöautoilla tuotantolaitokselta Rauman satamaan, josta se voitaisiin hyödyntää meriliikennettä varten. ^[24] Rauman lisäksi myös Poriin ollaan tehty selvitystyötä Green North Energy:n toimesta vihreän ammoniakkitehtaan rakentamisesta. Kyseisen tehtaan vuosituotanto olisi noin 210 000 tonnia. ^[25] ^[26]



Tekniset näkökulmat



Infrastrukturi

Ammoniakkia valmistetaan tällä hetkellä jo suuria määriä lannoiteteollisuutta varten jonka takia sillä on jo olemassa olevia kuljetustapoja ja rakennettua infrastruktuuria. Merilogistiikan kannalta bunkrausmahdollisuudet ovat kuitenkin keskeisessä asemassa, kun arvioidaan uuden polttoaineen laajempaa käyttöönottoa. Ammoniakin osalta infrastrukturi hankkeita on jo kehitteillä ja vuoden 2023 lokakuussa Yara, sekä Azane Fuel Solutions ilmoittivat yhteistyöstään ensimmäisen bunkrausyksikön rakentamiseksi, mikä osoittaa konkreettista edistystä tämän infrastruktuurin kehittämisessä. [27] Ammoniakkia ei voida sellaisenaan käyttää nykyisessä polttoaine infrastruktuurissa, joka tarkoittaa, että sen laajempi käyttö merenkulussa tulee vaatimaan myös paljon investointeja infrastruktuurin osalta.

Kuljetus

Ammoniakin varastointi-, kuljetus ja jakeluteknologia on jo erittäin kehittyntä. Tämän lisäksi tietotaito, käytännöt, koulutukset, määräykset, sekä standardit ovat vakiintuneita, jotka tulevat helpottamaan sen käyttöönottoa merenkulussa. [28]

Ammoniakkia voidaan kuljettaa pienempiä määriä ja lyhyempiä matkoja säiliöautojen, putkistojen ja junien avulla. Suurin osa kuljetetusta ammoniakista

kuitenkin kuljetetaan meriteitse. Tällä hetkellä vuosittain noin 20 Mt tuotetusta ammoniakista kuljetetaan meritse 170:llä eri aluksella. [29] Nämä laivat kuljettavat ammoniakin nestemäisenä samantyyppisesti kuin nestekaasua, mikä voisi myös mahdollistaa tulevaisuudessa nestekaasukuljetusaluksen uudelleenkäytön ammoniikkikuljetuksia varten. Tämän tyyppiset alukset pystyvät kuljettamaan noin 30 000–80 000 m³ eli noin 20–55 kilotonnia ammoniakkia. [30]

Varastointi

Ammoniakkia voidaan varastoida nestemäisenä tai kaasuna. Ammoniakin varastointi nestemäisenä on tyypillisesti parempi vaihtoehto, koska se vie vähemmän tilaa, mikä tekee siitä tehokkaamman ja kätevämmän vaihtoehdon suurien määrien varastointiin ja kuljettamiseen. Ammoniakin kiehumispiste on -33 °C, mikä tarkoittaa, että sen varastointi nesteinä on huomattavasti helpompaa kuin esimerkiksi LNG:n tai vedyn, joiden kiehumispisteet ovat -162 °C ja -252 °C. Nestemäinen varastointi vaatii kryosäiliöitä, jotka jatkuvasti jäädyttävät ammoniakkia, jotta lämpötila ei nouse yli kiehumispisteen. Nämä kryosäiliöt tyypillisesti vievät enemmän tilaa kuin perinteiset polttoainesäiliöt. Nestekaasun kiehumispisteen (-42 °C) ollessa hieman matalampi kuin ammoniakin, voidaan nestekaasu

kryosäiliötä myös käyttää ammoniakin varastointia varten. [31]

Säiliöissä, sekä muissakin materiaaleissa, jotka ovat kosketuksissa ammoniakiin on huomioitava sen syövyttävyyden. Ammoniakki aiheuttaa korroosiota erilaisissa teräksissä, sekä muissa metalleissa, erityisesti kosteuden ollessa läsnä. Nestemäiseen ammoniakiin liuenut happi voi pahentaa korroosiota putkistoissa ja säiliöissä, joilla ammoniakkia kuljetetaan ja säilytetään. Lisäksi ammoniakki voi reagoida ilmassa olevien typpi- ja rikkioksidien kanssa, muodostaen lukuisia yhdisteitä, kuten ammoniakkisulfaattia ja ammoniumnitraattia. Nämä yhdisteet voivat myös reagoida erilaisten materiaalien kanssa, lisäten korroosion riskiä. Ammoniakin turvallisuusriskien vaikutuksesta varastoinnissa ja säilytyksessä on oltava erittäin huolellinen, jotta nämä riskit ja vaarat voidaan minimoida. [32]

Aluksissa ammoniakin varastointia säätelee IMO:n IGC säädös. Polttoainesäiliöiden sijainti on suunniteltava siten että riskit säiliöiden vahingoittumiseen minimoidaan. Säiliöiden on muun muassa oltava riittävän kaukana konehuoneesta ja muista korkean paloriskin alueista, sekä paikoilta, joissa voi tapahtua erilaisia mekaanisia vaurioita esimerkiksi nosturionnettomuuksien vaikutuksesta. [33]

Tekniset näkökulmat

Käyttö polttoaineena

Ammoniakki on monipuolinen polttoaine, jota voidaan hyödyntää usealla eri tavalla. Sitä voidaan muun muassa käyttää polttomoottoreissa perinteisten polttoaineiden tavoin. Ammoniakkia voidaan myös käyttää polttokennoissa, jotka tuottavat sähköä kemiallisen reaktion avulla ilman perinteistä palamisprosessia. Lisäksi ammoniakkia voidaan krakata eli pilkkoa sen rakenneosiin, jolloin saadaan vedyn ja typen seos. Tämä prosessi mahdollistaa vedyn hyödyntämisen vetykäyttöisissä polttomoottoreissa tai -kennoissa.

Ammoniakki on ottanut merkittäviä harppauksia merenkulun polttoainekäytössä viime vuosina. Esimerkiksi yhdysvaltalainen yritys Amogy on onnistuneesti demonstroinut ammoniakin toimivuuden erilaisissa kulkuneuvoissa, kuten traktoreissa ja rekoissa. Lisäksi he ovat aloittaneet yhteistyön SEAM-yrityksen kanssa projektissa, jossa he retrofittavat ammoniakkijärjestelmän hinaaja-alukseen. Amogyn ammoniakki polttoainejärjestelmät perustuvat ammoniakin krakkaukseen.^[34] Ammoniakin krakkaus vedyksi on Amogyn lisäksi herättänyt kiinnostusta monelta muulta yritykseltä ja sen rooli

merenkulun tulevaisuuden näkymässä on vielä avoinna. Etuina ammoniakin krakkauksessa vedyksi on muun muassa se, että ammoniakkia on huomattavasti helpompi varastoida kuin vetyä.^[35]

Tutkimusta on myös tehty ammoniakilla toimivista polttokennoista. Esimerkiksi vuonna 2023 julkaistussa tutkimuksessa esiteltiin suunnittelukonsepti 2200–2800 TEU:n konttialuksesta, jonka voimanlähteenä toimi kiinteäoksidipolttokenno. Tutkimuksessa tutkijat totesivat, että ammoniakki ja polttokennot voisivat käytännössä toimia kyseisen tyyppisen laivan voimanlähteenä, mutta teknologia vaatii vielä optimointia usealla eri osa-alueella.^[36]

Ammoniakki polttokennojen ja krakkauksen lisäksi, ammoniakki polttomoottorit ovat kasvattaneet suosioitaan lähiaikoina. Esimerkiksi autovalmistajat GAC Group ja Toyota ovat yhteistyössä julkaisseet vuonna 2023 prototyypin, joka hyödyntää ammoniakkimoottoria henkilöautoissa.^[37] Laivateollisuudessa sen sijaan moottorivalmistaja MAN Energy Solutions raportoi syksyllä 2023 onnistuneesta laboratorio koeajosta heidän kaksitahti ammoniakkimoottorillaan. Heidän ta-

voitteensa olisi saada kyseisen tyyppiset moottorit kaupalliseen käyttöön vuoteen 2026 mennessä.^[38] Man Energy Solutionin lisäksi Wärtsilä julkaisi oman tiedotteen syksyllä 2023 maailman ensimmäisestä kaupallisesti saatavilla olevasta nelitahti ammoniakkimoottorista. Tiedotteen mukaan yrityksen tavoitteena oli solmia kaupallisia sopimuksia moottorista jo alkuvuodesta 2024.^[39] Huhtikuussa 2024 raportoitin, että Wärtsilä toimittaa ensimmäisen ammoniakkimoottorinsa vuoden 2025 alkupuolella.^[40]

Muutkin merenkulun moottorivalmistajat kuten Hyundai Heavy Industries, STX Engine, Winterthur Gas & Diesel, sekä IHI Power Systems tutkivat ja kehittävät ammoniakkimoottoreita ja pyrkivät tuomaan markkinoille näitä muutaman vuoden sisällä.^[41]

Kyseiset hankkeet, prototyypit ja tutkimukset osoittavat ammoniakin toimivuuden erilaisissa ratkaisuisissa, sekä nopeuttavat ammoniakin käyttöä merenkulun polttoaineena. Arvioiden mukaan ammoniakin osuus merenkulun polttoainemarkkinoista vuoteen 2050 mennessä voi olla noin 20–60 % riippuen eri skenaarioista.^[42]

Ympäristö näkökulmat



Ammoniakin rooli merilogistiikan vihreässä siirtymässä on merkittävä, sillä se tarjoaa kestävän vaihtoehdon perinteisille polttoaineille. Ammoniakki voidaan tuottaa uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman avulla, mikä vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista tai raaka-aineista ja näin ollen alentaa merenkulun päästöjä. Lisäksi ammoniakin logistinen ketju ja varastointi ovat jo olemassa olevia infrastruktuureja, mikä helpottaa sen integroimista osaksi vihreämpää merenkulkua. Näin ollen ammoniakki näyttää lupaavalta vaihtoehdolta merilogistiikan kestävässä tulevaisuudessa, mutta sen haittapuolekset on kuitenkin ymmärrettävä ja huomioitava.

Kasvihuonekaasupäästöt

Kuten aikaisemmin todettu, ammoniakki ei itsessään sisällä hiiltä, joten sen käytössä ei synny lainkaan hiilidioksidia tai muitakaan hiilipohjaisia kasvihuonekaasuja. Tästä huolimatta ammoniakki polttomootoreissa kuitenkin syntyy epätäydellisen palamisen vaikutuksesta dityppioksidia (N_2O), joka on yli kaksisataa kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu verrattuna hiilidioksidiin. Jotkut tutkimukset ovat osoittaneet,

että lisääntynyt dityppioksidi ilmakehässä saattaa kumota ammoniakin hiilivapaat edut, johtaen nopeamaan ilmastonmuutokseen verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.^[43] Aihe vaatii kuitenkin vielä lisätutkimusta, jotta ammoniakin aiheuttaman dityppioksidin todelliset vaikutukset ymmärrettäisiin paremmin.

Kasvihuonekaasupäästöjen kannalta on myös tärkeä huomioda miten ammoniakki on tuotettu, sillä harmaalla tai ruskealla ammoniakilla on huomattavasti korkeammat elinkaari-päästöt kuin vihreällä ammoniakilla.

Typen oksidien (NOx) päästöt

Ammoniakki itsessään sisältää typpeä, joten sen käyttö polttoaineena tuottaa paljon NOx-päästöjä. Lisäksi päästöjen määrään vaikuttaa, mikäli ammoniakin palaminen polttomootorissa on epätäydellistä. NOx-päästöjä voi myös syntyä, mikäli savukaasuissa on palamatonta ammoniakkia mukana, sillä ammoniakki reagoi ilmakehässä tuottaen erilaisia typen oksideja kuten dityppioksidia.^[44]

Rikin oksidien (SOx) päästöt

Ammoniakki ei sisällä rikkiä, jon-

ka takia sen tuottamat rikin oksidien päästöt ovat käytännössä olemattomat. SOx-päästöjä voi kuitenkin syntyä pieniä määriä epäpuhtauksien vaikutuksesta, joita polttoaineessa saattaa olla. Epäpuhtauksien lisäksi, rikin oksidien päästöjä voi syntyä pilottipolttoaineesta, mikäli semmoista on käytössä. Alhaisten SOx-päästöjen vaikutuksesta ammoniakki on erinomainen polttoaine vaihtoehdona rikin oksidien päästöjen valvonta-alueille.^[45]

Muut päästöt

Ammoniakin käyttö polttoaineena tuottaa hyvin vähäisiä määriä pienhiukkas päästöjä verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. Pienhiukkasten määrä voi kasvaa, mikäli ammoniakin kanssa käytetään pilottipolttoainetta.^[46] Muihin päästöihin voi myös luokitella palamattoman polttoaineen aiheuttamat ammoniakki päästöt.

Ammoniakkivuodot

Ekosysteemeille suuret ammoniakkivuodot voivat olla erittäin tuhoisia. Maalla ammoniakki esimerkiksi kuluttaa kasvien lehdistä olevaa vettä, kun taas vesistöissä ammoniakki voi tappaa herkempiä kala ja vesilajeja, sekä aiheuttaa rehevöitymistä ja pH-muutoksia.^{[47] [48]}

Yhteenveto

Ammoniakki ei ole vielä käytössä merenkulussa ja se nähdään vedyn tavoin tulevaisuuden polttoaineena, sillä sen käyttöön liittyy edelleen merkittäviä haasteita. Yksi suurimmista haasteista on turvallisuus, sillä ammoniakki on erittäin myrkyllistä ja se voi vuototapauksissa olla vaarallista sekä ihmisille, että ympäristölle. Keskeisessä roolissa tulee siis olemaan turvallisuustoimenpiteiden parantaminen ja ammoniakkia käsittelevien henkilöiden koulutus, jotta ammoniakin käyttö merenkulussa voisi yleistyä tulevaisuudessa. Ammoniakin

tehokas käyttö polttoaineena edellyttää myös teknologian ja infrastruktuurin kehittämistä, jotta sen käsittely, varastointi ja poltto voidaan toteuttaa mahdollisimman turvallisesti ja tehokkaasti.

Ammoniakilla on kuitenkin merkittäviä etuja verrattuna moneen muuhun vaihtoehtoiseen polttoaineeseen. Ammoniakki ei muun muassa sisällä lainkaan hiiltä, joten sen käytöstä ei synny hiilidioksidipäästöjä. Epäpuhdas palaminen voi kuitenkin tuottaa dityppioksidipäästöjä, joka on huomattavasti voimak-

kaampi kasvihuonekaasu. On myös tärkeä huomioida, että vaikka ammoniakkia voidaan valmistaa uusiutuvien energialähteiden avulla, niin suurin osa nykyisestä ammoniakista tuotetaan fossiilisista raaka-aineista. Tällä on merkittävä vaikutus ammoniakin elinkaaripäästöihin.

Mikäli ammoniakin käyttöön liittyvät haasteet ratkaistaan, siitä voi tulla yksi merenkulun tärkeimmistä polttoaineista. Tämä auttaisi vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä ja edistäisi kestävämpää meriliikennettä.

Vahvuudet

- + Ammoniakki on yksi harvoista hiilivapaista polttoaineista ja sitä voidaan tuottaa uusiutuvilla energianlähteillä, joten sillä on potentiaalia vähentää merenkulun kasvihuonepäästöjä merkittävästi
- + Ammoniakki ei tuota juuri lainkaan SOx- tai pienhiukkaspäästöjä
- + Ammoniakkia tuotetaan tällä hetkellä jo suuria määriä, joten sen tuotannolle ja jakelulle on jo olemassa olevaa infrastruktuuria
- + Nestemäistä ammoniakkia on helpompi varastoida kuin esimerkiksi LNG:tä tai nestemäistä vetyä sen suhteellisen korkean höyrystyslämpötilan vaikutuksesta
- + Ammoniakkia on tuotettu jo pitkään, joten sen valmistuksesta löytyy paljon kokemusta ja tietoa

Heikkoudet

- Ammoniakki ei ole vielä käytössä merenkulussa joten sen käyttöön liittyvät standardit ja käytännöt ovat vielä kehitysvaiheessa
- Ammoniakki on erittäin myrkyllistä, joka tekee sen käytöstä haasteellista
- Saattaa vaatia pilottipolttoaineita toimiakseen polttomoottoreissa
- Suurin osa ammoniakista on tällä hetkellä valmistettu hyödyntäen fossiilista raaka-aineita
- Ammoniakin energiatiheys on huomattavasti heikempi kuin fossiilisten polttoaineiden
- Lannoiteteollisuus käyttää paljon ammoniakkia, joten se saattaa vaikuttaa ammoniakin saatavuuteen
- Epätäydellinen palaminen tuottaa erilaisia päästöjä kuten dityppioksidisia
- Ammoniakki sisältää typpeä, joten sen poltto aiheuttaa paljon typpioksidipäästöjä

Lähteet

- [1] American Chemical Society. (n.d.). Molecule of the Week Archive: Ammonia. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.acs.org/molecule-of-the-week/archive/a/ammonia.html>
- [2] Suryanto, B. H. R., Matuszek, K., Choi, J., Hodgetts, R. Y., Du, H., Bakker, J. M., Kang, C. S. M., Cherepanov, P. V., Simonov, A. N., & MacFarlane, D. R. (2021). Nitrogen reduction to ammonia at high efficiency and rates based on a phosphonium proton shuttle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abg2371>
- [3] Marine & Offshore. (n.d.). An overview of ammonia as fuel for ships. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/shipping-decarbonization/future-fuels/ammonia>
- [4] Yara. (2023). The world's first clean ammonia-powered container ship. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.yara.com/corporate-releases/the-worlds-first-clean-ammonia-powered-container-ship/>
- [5] Kurkinen, A. (2020). Esiselvitys ammoniakin käytöstä merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa. (s. 9). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/340261/antti_kurkinen.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- [6] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 34). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [7] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 11, 33-36). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d3442279fca0d4ee24757ea
- [8] KBR. (n.d.). Blue ammonia. (s. 2). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.kbr.com/sites/default/files/documents/2023-10/Blue-Ammonia-Brochure.pdf>
- [9] Ringsgwandi, L. M., Schaffert, J., Brücken, N., Albus, R., & Görner, K. (2022). Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany. (s. 4). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/358926929_Current_Legislative_Framework_for_Green_Hydrogen_Production_by_Electrolysis_Plants_in_Germany
- [10] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 34). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [11] Iberdrola. (n.d.). Difference between green and blue hydrogen: The importance of the colours of hydrogen. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.iberdrola.com/about-us/what-we-do/green-hydrogen/difference-hydrogen-green-blue>

Lähteet

- [12] Department of Energy. (n.d.). Hydrogen Production: Biomass Gasification. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-bio-mass-gasification>
- [13] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 34). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [14] Salahi, M. M., Andwari, A. M., Könnö, J., Gharehghani, A. (2022). Hydrogen and ammonia fuelled internal combustion engines, a pathway to carbon-neutral fuels future. (s. 34). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/33759/nbn-fi-fe2022120970382.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [15] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 11). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [16] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 12-14). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [17] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 12-14). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [18] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 22, 23). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [19] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 14-16). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [20] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 15). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [21] Institute for Sustainable Process Technology. (2022). Clean Ammonia Roadmap. (s. 5). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/346613410/2024-ISPT-Clean-Ammonia-Roadmap-report_online-versie.pdf
- [22] Jupiter Ionics. (n.d.). Our Technology. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://jupiterionics.com/our-technology/>

Lähteet

- [23] Lindholm, P., & Halla-Aho, E. (2023). Suomi on saamassa uuden miljardi-investoinnin: Amerikkalaisyhtiö suunnittelee Suomeen kolmea vedyntuotantolaitosta. Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://yle.fi/a/74-20034105>
- [24] Jokinen, J. (2024). Selvitys: Raumalle kannattaisi rakentaa ammoniakkilaitos. (s. 6). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: <https://epress.fi/reader/issue/10496/372281/6>
- [25] Business Finland. (2024). Green North Energy monistaa Business Finlandin rahoittamaa vetylaitoskonseptiaan Poriin ja Kemiin – Tähtäimessä Suomen omavaraisuus ammoniakin tuotannossa. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.businessfinland.fi/ajankohtaista/uutiset/tiedotteet/2024/green-north-energy-monistaa-business-finlandin-rahoittamaa-vetylaitoskonseptiaan-poriin-ja-kemiin--tahtaimessa-suomen-omavaraisuus-ammoniakin-tuotannossa>
- [26] Varsinais-Suomen ELY-keskus. (2024). Green North Energy Oy, Vihreän vedyn ja ammoniakin tuotantolaitos, Naantali. Haettu 09.10.2024 osoitteesta: <https://www.ymparisto.fi/fi/osallistu-ja-vaikuta/ymparistovaikutusten-arviointi/green-north-energy-oy-vihrean-vedyn-ja-ammoniakin-tuotantolaitos-naantali>
- [27] Yara. (2023). Yara and Navigator Holdings Ltd. Lead Investment Into Azane Fuel Solutions To Realize World's First Ammonia Bunkering Solution. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.yara.com/corporate-releases/yara-and-navigator-holdings-ltd.-lead-investment-into-azane-fuel-solutions-to-realize-worlds-first-ammonia-bunkering-solution/>
- [28] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 28). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [29] International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 22). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d-3442279fca0d4ee24757ea
- [30] Institute for Sustainable Process Technology. (2022). Clean Ammonia Roadmap. (s. 46). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://ris.utwente.nl/ws/portalfiles/portal/346613410/2024-ISPT-Clean-Ammonia-Roadmap-report_online-versie.pdf
- [31] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 10-11, 20). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [32] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 10, 14, 20). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>

Lähteet

- [33] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 20). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [34] Amogy. (2023). Moving the Maritime Industry Closer to Clean Energy, Amogy is Building the World's First Ammonia-Powered, Zero-Emission Ship. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://amogy.co/moving-the-maritime-industry-closer-to-clean-energy-amogy-is-building-the-worlds-first-ammonia-powered-zero-emission-ship/>
- [35] Topsoe. (n.d.). Energize your business with proven ammonia cracking at scale. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.topsoe.com/ammonia-cracking>
- [36] Louvros, P., Trivyza, N. L., Komianos, A., & Boulougouris, E. (2023). Fuel cell, ammonia powered container ship: A case study. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146523010116?ref=cra_js_challenge&fr=RR-1
- [37] Anderson, B. (2023). GAC And Toyota Have Created An Ammonia-Powered 2.0-Liter Engine. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.carscoops.com/2023/07/gac-and-toyota-have-created-an-ammonia-powered-2-0-liter-engine/>
- [38] Snyder, J. (2023). MAN ES's ammonia-fuelled two-stroke engine clears another hurdle. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/man-ess-ammonia-fuelled-two-stroke-engine-clears-another-hurdle-77328>
- [39] Wärtsilä. (2023). Wärtsilä jatkaa merenkulun hiilidioksidipäästöjen vähentämistä esittelemällä maailman ensimmäisen ammoniakilla toimivan nelitahtimoottoriratkaisun. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.wartsila.com/fi/media-fi/uutinen/15-11-2023-wartsila-jatkaa-merenkulun-hiilidioksidipaastojen-vahentamista-esittelemalla-maailman-ensimmaisen-ammoniakilla-toimivan-nelitahtimoottoriratkaisun-3357985>
- [40] gCaptain. (2024). Wartsila to Deliver its First Ammonia Ship Engine in Early 2025. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://gcaptain.com/wartsila-to-deliver-its-first-ammonia-ship-engine-in-early-2025/>
- [41] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 16-19). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [42] Atchison, J. (2023). IEA: ammonia key to decarbonising shipping by 2050. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://ammoniaenergy.org/articles/iea-ammonia-key-to-decarbonising-shipping-by-2050/>
- [43] Pedersen, K. A., Lewandowski, M. T., Schulze-Netzer, C., Pasternak, M. & Løvås, T. (2023). Ammonia in Dual-Fueled Internal Combustion Engines: Impact on NO_x, N₂O, and Soot Formation. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.3c02549>

Lähteet

- [44] Pai, S. J., Heald, C. L., & Murphy, J. G. (2021). Exploring the Global Importance of Atmospheric Ammonia Oxidation. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.1c00021>
- [45] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2023). Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels. (s. 16). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf
- [46] Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping. (2023). Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels. (s. 10, 16). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Ammonia-emissions-reduction-position-paper_v4.pdf
- [47] Korean Register. (2022). Ammonia Outlook Report: Setting Course for a Zero-Carbon Marine Fuel. (s. 12-14). Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.krs.co.kr/eng/Brochure/ListView.aspx?MRID=559>
- [48] Department of Agriculture. (n.d.). Ecological Effects of Ammonia. Haettu 23.05.2024 osoitteesta: <https://www.mda.state.mn.us/ecological-effects-ammonia>

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.3-4** Kuvio 2:
International Renewable Energy Agency. (2022). Innovation outlook: Renewable Ammonia. (s. 22). Haettu 05.06.2024 osoitteesta: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/May/IRENA_Innovation_Outlook_Ammonia_2022.pdf?rev=50e91f792d3442279fca0d4ee24757ea
- 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: 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.6** 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
- Adobe Stock: Puchthanun. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/oil-terminal-is-industrial-facility-for-storage-of-oil-and-gas-industry/679913314>
- s.7** 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.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: The Deep Designer. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/638437077?asset_id=638437077
- s.2-18** 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