

Antti Kurkinen

# Esiselvitys ammoniakin käytöstä merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa

Kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyö  
Merenkulun koulutus

2020



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

| <b>Tekijä/Tekijät</b>   | <b>Tutkinto</b>               | <b>Aika</b>   |
|---|-------------------------------|---------------|
| Antti Kurkinen  | Merenkulun<br>insinööri (AMK) | Toukokuu 2020 |
| <b>Opinnäytetyön nimi</b>   |                               | 25 sivua      |
| Esiselvitys ammoniakkin käytöstä merenkulun polttoaineena<br>Kirjallisuuskatsaus  |                               |               |
| <b>Toimeksiantaja</b>   |                               |               |
| Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (XAMK)<br>Logistiikan ja Merenkulun TKI  |                               |               |
| <b>Ohjaaja</b>  |                               |               |
| Joel Paananen   |                               |               |
| <b>Tiivistelmä</b>  |                               |               |
| <p>Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kirjallisuuskatsauksena, pystytäänkö ammoniakkia käyttämään merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa. Lisäksi tutkitaan, täyttääkö ammoniakki osaltaan Pariisin ilmastopimuksessa sovitut vuonna 2050 voimaan astuvat tavoitteet.</p> <p>Tutkimuksessa tarvittavat tiedot etsittiin käyttäen Google Scholar -, Science Direct - ja Kaakuri-tietokantoja.</p> <p>Aluksi tutkittiin, kuinka ammoniakkia valmistetaan nykyisin Haber-Bosch-menetelmällä. Vaihtoehtoiseksi ympäristöystävällisemmäksi, mutta kalliimmaksi valmistusprosessiksi osoittautui elektrokemiallinen synteesi.</p> <p>Työssä etsittiin tietoa ammoniakkin käytöstä polttomoottoreissa ja analysoitiin artikkeleita valmistajien suunnitelmista tehdä ammoniakkikäyttöisiä laivamoottoreita. Seuraavaksi tutkittiin, kuinka ammoniakkia nykyisin varastoidaan ja voisiko nykyisiä tapoja soveltaa laivojen polttoainetankkien suunnittelussa tulevaisuudessa. Ammoniakin jakelu tulevaisuudessa polttoainekäyttöön arveltiin olevan mahdollista toteuttaa nykyisiä kemikaalisatamia käyttäen sekä rakentamalla uusia tuotantolaitoksia ja jakelusatamia.</p> <p>Ammoniakin havaittiin olevan päästöillä mitattuna ylivoimainen polttoaine verrattaessa sitä nesteytettyyn maakaasuun. Maakaasun tuotannosta ja käytöstä aiheutuvat vuodot yksistään ylittävät Pariisin ilmastopimuksessa olevat tavoitteet. Ammoniakin kylmästä varastointilämpötilasta arveltiin olevan hyötyä suunnitellessa uusia aluksia. Energia säästyy, kun ei tarvitse lämmittää eikä paineistaa polttoainesäiliöitä. Lisäksi kylmyyttä voisi esimerkiksi ottaa hyötykäyttöön lämmönvaihtimilla tankeista.</p> <p>Näin ollen kirjallisuuskatsauksen perusteella ammoniakki olisi ylivertainen tulevaisuuden polttoaine merenkulussa.</p> |                               |               |
| <b>Asiasanat</b>  |                               |               |
| ammoniakki, merenkulku, polttoaine, polttomoottorit, päästöt, Pariisin ilmastopimus   |                               |               |

| Author (authors)  | Degree                              | Time     |
|---|-------------------------------------|----------|
| Antti Kurkinen  | Bachelor of Engineering in Maritime | May 2020 |
| <b>Thesis title</b>   |                                     | 25 pages |
| Use of ammonia as marine fuel<br>Literary review  |                                     |          |
| <b>Commissioned by</b>  |                                     |          |
| South-Eastern Finland University of Applied Sciences (XAMK)<br>Logistics, Marine Technology and Transport; RDI  |                                     |          |
| <b>Supervisor</b>   |                                     |          |
| Joel Paananen   |                                     |          |
| <b>Abstract</b>   |                                     |          |
| <p>In this thesis, a literary review was made to study if ammonia could be used as a marine fuel in the future. Additionally, the aim was to examine if the use of ammonia would meet the environmental requirements set for 2050 as stated in the Paris Agreement.</p>   |                                     |          |
| <p>The information required to make this assessment were searched using Google Scholar, Science direct and Kaakkuri databases.</p>  |                                     |          |
| <p>First, it was studied how ammonia is produced today by the Haber-Bosch process. Electrochemical synthesis was found to be more environmentally friendly but more expensive method of producing ammonia.</p>  |                                     |          |
| <p>This review was focused on the use of ammonia as a fuel in combustion engines. Moreover, articles on ship engine manufacturers' plans to start the production of combustion engines running on ammonia fuel were studied. After that, the aim was to examine how ammonia is stored today and if current storage construction methods could be applied in the design of fuel tanks in the future. The supply of ammonia for ships to be used as a fuel in the future was considered possible by using the existing chemical cargo infrastructure and by building new production sites and supplying facilities.</p> |                                     |          |
| <p>It was discovered in this study, that ammonia is a superior fuel compared to LNG if measured by emissions. Merely the emissions caused by production and usage of LNG exceed the targets of the Paris Agreement. It was believed that the cold storing temperature of liquid ammonia could be useful when designing new ships. Energy could be saved as fuel is not needed to be heated any more. In addition, the coldness of fuel could be harnessed from fuel tanks using heat exchangers.</p>  |                                     |          |
| <p>In conclusion according to information found in this literary review ammonia would be an exceptionally good fuel in the future of maritime.</p>  |                                     |          |
| <b>Keywords</b>   |                                     |          |
| Ammonia, maritime, fuel, combustion engines, emissions, Paris climate agreement   |                                     |          |

## SISÄLLYS

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | JOHDANTO, TAVOITTEET JA TUTKIMUSMENETELMÄ..... | 6  |
| 2     | PARIISIN ILMASTOSOPIMUS.....                   | 7  |
| 3     | AMMONIAKKI .....                               | 7  |
| 3.1   | Ammoniakista yleisesti .....                   | 7  |
| 3.2   | Ammoniakin valmistus.....                      | 8  |
| 3.2.1 | Haber-Bosch-menetelmä.....                     | 9  |
| 3.2.2 | Elektrokemiallinen synteesi .....              | 10 |
| 4     | AMMONIAKIN KÄYTTÖ MERENKULUSSA .....           | 11 |
| 4.1   | Ammoniakki polttomoottorikäytössä .....        | 11 |
| 4.2   | Ammoniakin varastointi .....                   | 11 |
| 4.3   | Ammoniakin jakelu .....                        | 12 |
| 4.4   | Ammoniakin hyödyt.....                         | 12 |
| 5     | NESTEYTETTY MAAKAASU (LNG).....                | 13 |
| 6     | KEHITTEILLÄ OLEVIA PROJEKTEJA.....             | 15 |
| 6.1   | Wärtsilä .....                                 | 15 |
| 6.2   | MAN energy solutions .....                     | 16 |
| 6.3   | Daewoo Shipbuilding & Engineering .....        | 16 |
| 7     | POHDINTA.....                                  | 17 |
| 8     | YHTEENVETO.....                                | 21 |
| 9     | LÄHTEET .....                                  | 22 |
|       | KUVALUETTELO .....                             | 25 |

## LYHENNELUETTELO

|      |  |
|------|--|
| DSME | Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering |
| EU   | Euroopan Unioni                          |
| HFO  | Heavy fuel oil                           |
| IMO  | International Maritime Organization      |
| LNG  | Liquefied natural gas                    |
| MDO  | Marine diesel oil                        |
| YK   | Yhdistyneet kansakunnat                  |

## 1 JOHDANTO, TAVOITTEET JA TUTKIMUSMENETELMÄ

Ihminen on teollisuuden ansiosta saanut aikaan merkittäviä muutoksia ilmassa. Lukuisien eri tutkimuslaitosten ja yliopistojen tekemien tutkimusten ja selvitysten perusteella ilmaston lämpeneminen tulee aiheuttamaan suuria muutoksia ympäristölle. Yhtenä tärkeänä ratkaisuna jo kehittyvään ongelmaan on kompensoida ihmisen tuottamat hiilidioksidipäästöt. Tämä käsillä oleva työ omalta osaltaan pyrkii avaamaan tätä ajankohtaista ja puhuttelevaa aihetta merenkulun näkökulmasta.

Meriteitse kuljetetaan yli 90 % kaikesta maailman kauppavarasta. Laivat käyttävät pääasiassa polttoaineena hiiliperäisiä polttoaineita, kuten raskasta polttoöljyä (HFO) sekä dieseliä (MDO). Tästä syystä laivat aiheuttavat jopa yli 3 % maailman saasteista (Oceana 2020). Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization - IMO) aikoo tiukentaa merenkulun hiilidioksidipäästörajoituksia vuonna 2050 (Hu ym. 2019, 1 - 27). Nykyiset polttoaineet eivät ole riittävän puhtaita täyttämään tulevia määräyksiä. Näin ollen on ajankohtaista alkaa tutkimaan vaihtoehtoisia uusiutuvia polttoaineita, jotka eivät saastuta ympäristöä. Polttoaineista ammoniakki otettiin päätutkimuskohteeksi ja sitä vertailtiin erittäin hyvänä vaihtoehtona pidettävään, nesteytettyyn maakaasuun. Vertailuja tehtiin sen saastuttavuudessa, käytettävyydessä ja sopivuudessa laivakäyttöön. Lisäksi tutkittiin, onko jo olemassa ratkaisuja ammoniakin käytöstä merenkulussa ja polttomoottoreissa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ammoniakin ominaisuuksia ja mahdollisuuksia polttoaineena merenkulussa, jotta päästäisiin Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteeseen sekä verrata sitä siinä suhteessa nesteytettyyn maakaasuun. Tutkimus oli luonteeltaan kirjallisuuskatsaus. Aineistona käytettiin Google Scholarista ja Science Direct -tietokannoista löytyviä raportteja ja tutkimuksia. Avainsanoina käytettiin muun muassa ammonia, LNG, internal combustion engine, maritime pollution ja Paris agreement. Koska suurin osa lähdemateriaalista on englanninkielistä kirjallisuutta, on tekijä kääntänyt suomeksi kaikki termit ja käsitteet, ellei näille termeille ollut jo vakiintunutta käännöstä.

## 2 PARIISIN ILMASTOSOPIMUS

Yhdistyneet Kansakunnat (YK) totesi yleiskokouksessa vuonna 2015, että ilmastonmuutos on ihmiskunnan yhteinen huoli. Sen takia tarvittaisiin maailmanlaajuisia yhteisiä toimenpiteitä päästöjen alentamiseksi. Lopulta YK koontui Ranskaan aikomuksena laatia suunnitelma kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Tästä tehtiin YK:ssa päätös joulukuussa 2015. Päätöksen mukaan allekirjoittajamaat aikovat saavuttaa hiilivapaan teollisuuden vuoteen 2050 mennessä. Tämä sopimus astui voimaan 2016. Päästöjen vähenemisellä pyritään rajoittamaan maapallon lämpeneminen kahteen Celsius-asteeseen. Konferenssiin osallistui edustajia 196 jäsenvaltiosta. (The Editors of Encyclopaedia Britannica 2015).

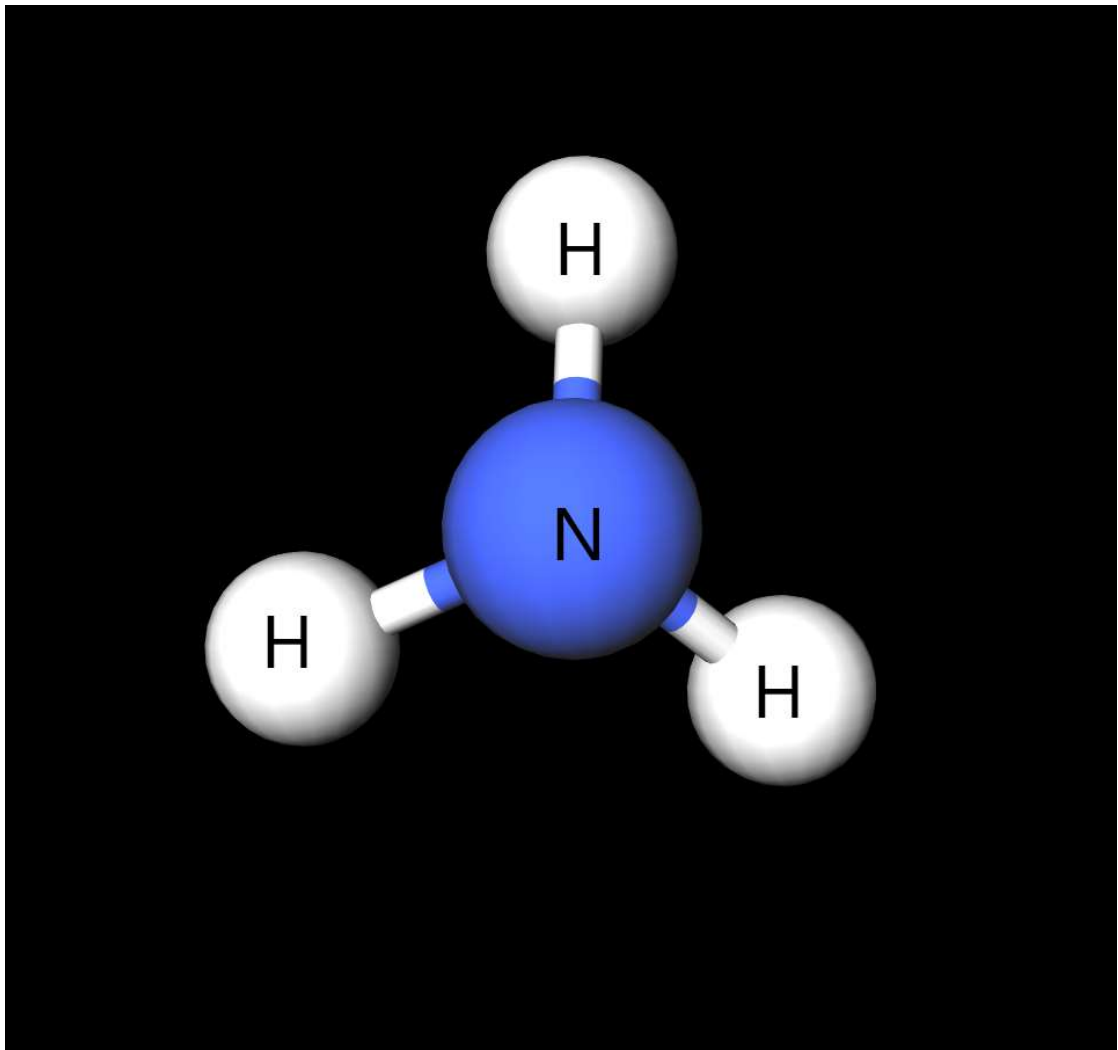
Pariisin ilmastopöytäsofimus on sopimus, jossa allekirjoittajavaltiot sekä Euroopan Unioni (EU) ovat sopineet niistä toimenpiteistä, joiden tavoitteina on saavuttaa hiilivapaa teollisuus vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaa hiilidioksidipäästöjen neutralisointia. Tämä tarkoittaa sitä, että hiilipäästöt täytyy saada vastaamaan hiilen käyttöä ja varastoimista maaperään, kasvistoon ja vesistöihin. Jotta tässä onnistuttaisiin, koko maailman on sitouduttava tekemään parhaansa sen saavuttamiseksi. (European Parliament 2019.)

## 3 AMMONIAKKI

### 3.1 Ammoniakista yleisesti

Ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) on erittäin myrkyllinen normaalisti kaasumaisessa muodossa oleva aine. Sen atomirakenne koostuu yhdestä typpi- ja kolmesta vetyatomista, kuva 1. Sen haju on hyvin voimakas ja kuvottava. Ammoniakkaa esiintyy kaikkialla luonnossa ja ihmisissä. Sitä muodostuu luonnossa bakteerien välityksellä sekä luonnollisesti maatumisen ja mätänemisen yhteydessä. (Atsdr 2004, 1.) Se on erittäin yleisesti käytetty kemikaali hyvin erilaisiin käyttötarkoituksiin eri teollisuustuotantojen aloilla. Nykyisin ammoniakin tuotanto tapahtuu pääasiassa Aasian ja Oseanian maissa. Suurimpina tuotantovaltioita ovat Kiina ja Intia. Sitä tuotettiin maailmanlaajuisesti vuonna 2018 yli 168 miljoonaa tonnia. Ammoniakkaa käytetään yli 80 prosenttisesti maataloudessa tarvittavien lannoitteiden tuotantoon. Aasian ja Oseanian maat ovat

myös kulutukseltaan suurimmat ammoniakkin käyttöalueet. (Ammonia Market 2019.)



Kuva 1 Ammoniakkimolekyylä

Ammoniakki on kemikaali, joka ei sisällä hiiltä. (Kobayashi ym. 2019, 1). Koska ammoniakki ei sisällä hiiltä, ei siitä myöskään muodostu hiilidioksidipäästöjä sitä poltettaessa. Näin ollen se voisi olla erittäin vakavasti otettava vaihtoehto hiilivapaana energianlähteenä myös merenkulussa.

### 3.2 Ammoniakin valmistus

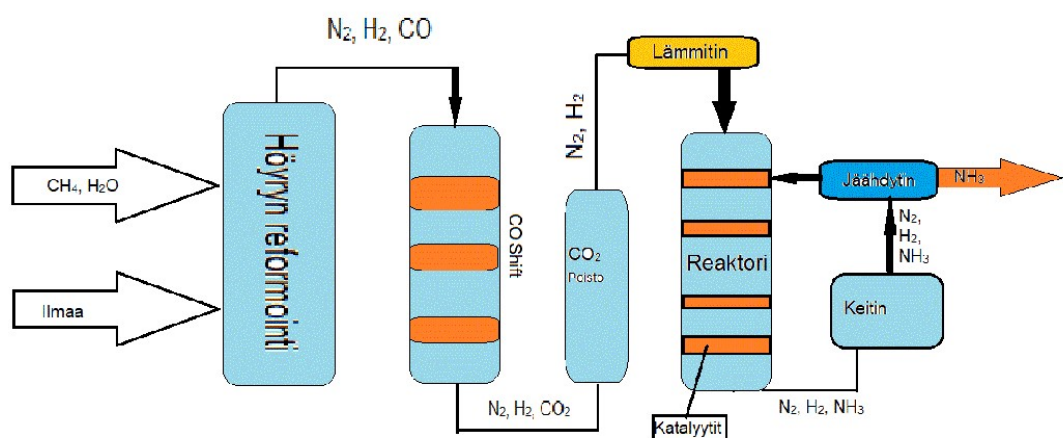
Nykyisin ammoniakkia valmistetaan yleisimmin maakaasusta tai luonnonkaasusta Haber-Bosch-menetelmällä. Jotta ammoniakista saataisiin täysin puhdasta, täytyy sen tuotantovaiheiden oltava kuitenkin päästöttömiä. Tämä on mahdollista toteuttaa käyttämällä uusiutuvia energialähteitä ammoniakkin valmistuksessa. Näitä ovat esimerkiksi tuuli- tai aurinkoenergia. (Bañares-



Alcántara ym. 2015, 109). Sähköllä ammoniakkia valmistaessa prosessia kutsutaan elektrokemikaaliseksi synteeksiksi (Electrochemical synthesis). (Kyriakou ym. 2011, 3).

### 3.2.1 Haber-Bosch-menetelmä

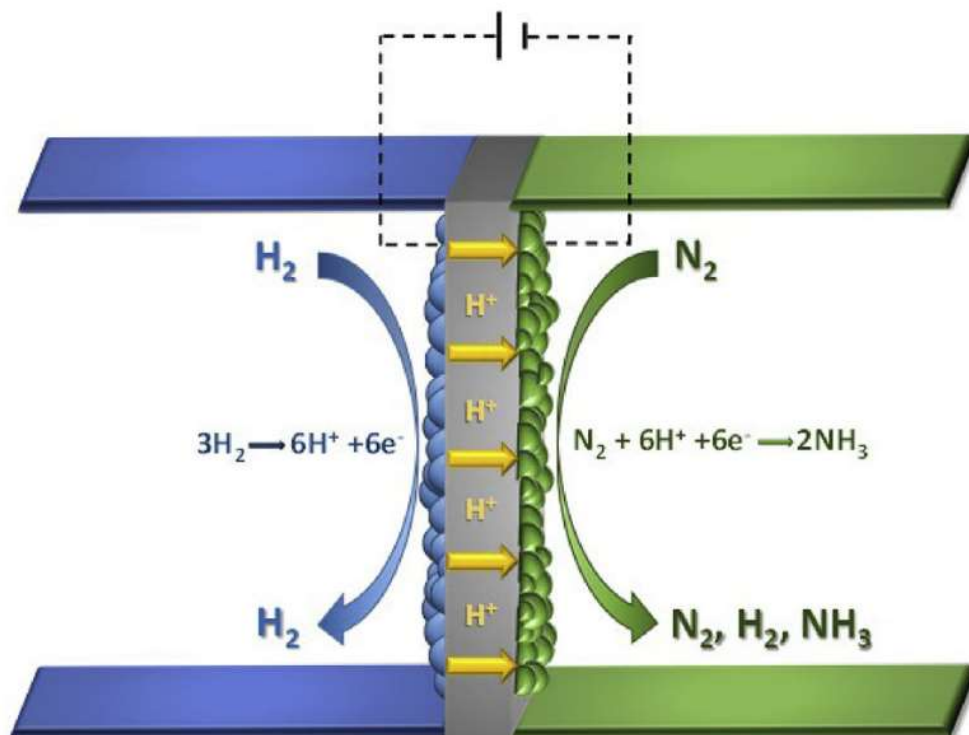
Ammoniakki ( $\text{NH}_3$ ) on yksinkertainen kemikaali. Sitä saadaan aikaiseksi yhdistämällä typpeä ja vetyä. Vetyä saadaan reformoimalla vetypitoinen polttoaine, tässä tapauksessa maakaasu tai luonnonkaasu, vetypitoiseksi kaasuseokseksi polttokennossa. Toisessa vaiheessa kaasuseos reformoidaan puhtaaksi vedyksi korkeassa lämpötilassa. Haber-Bosch-menetelmäksi kutsutussa prosessissa typpi ja vety yhdistetään puristamalla ne katalyyttien yli ammoniakkireaktoriin (Kuva 2). Katalyyttinä käytetään rautaoksidi- tai metallikarbidijauhetta, jonka syöpyminen on estetty puhdistamalla alkuaineet epäpuhtauksista. Koska tässä menetelmässä vetyä tuotetaan hiiliyhdisteitä sisältävistä aineista, ei voida puhua uusiutuvasta energiasta. (Pattabathula ja Richardson 2016a.)



Kuva 2 Haber-Bosch-menetelmä

### 3.2.2 Elektrokemiallinen synteesi

Ammoniakkia voidaan valmistaa myös elektrokemiallisen synteessin avulla sen alkuaineista, kaasumaisista vedystä ja typestä. Elektrolyyttiprosessi tapahtuu noin 100-500 °C lämpötilassa esimerkiksi kaksikammioisessa reaktorissa, jossa kammioiden välissä on puolijohtava kalvo, jonka ylitse johdetaan sopiva jännite. Kalvon tehtävänä on kuljettaa tarvittavat vetyprotonit (H<sup>+</sup>) vetykammionosta typpikammioon, jossa vetyprotoni sitten reagoi typen kanssa. Anodina toimii vetykammion puoleinen kalvon osa ja jännitteen avulla vetykaasu muuntuu vetyprotoneiksi ja elektroneiksi. Kalvon toinen puoli toimii katodina, joka vastaavasti muuntaa yhdistämällä sen pinnassa läpi kalvon läpi tulleet protonit typpi-atomeihin, jolloin tuloksena on ammoniakkia. Elektrolyytin etuna verrattuna esimerkiksi Haber-Bosch-menetelmään on, että elektrolyyttiprosessi tapahtuu myös normaali-ilmanpaineessa, eikä korkeapaineistusta tarvita. (Kyriakou ym. 2017 3–4.) Elektrokemiallista synteesiä esittää Kuva 3.



Kuva 3 Elektrokemiallinen synteesi (Kyriakou ym. 2017)

Elektrokemiallisen synteessin käyttökelpoisuus taloudellisuutta ja ympäristövai-  
kutuksia ajatellen on riippuvainen sen suuresta energian tarpeesta valmistus-

prosessissa. Mikäli prosessiin vaadittava energia tuotetaan uusiutuvalla energialla, kuten aurinkoenergialla tai tuulienergialla, saadaan tuotantoprosessi täysin hiilidioksidipäästöttömäksi. (Kyriakou ym., 2017, 11.)

## **4 AMMONIAKIN KÄYTTÖ MERENKULUSSA**

### **4.1 Ammoniakki polttomoottorikäytössä**

Nykyisin merenkulun pääsääntöinen propulsiojärjestemien ja sähköntuotannon polttomoottorien polttoaine on raskas polttoöljy (HFO). HFO sisältää hiiliyhdisteitä, joista pyritään pääsemään eroon Pariisin ilmastopimuksen vaatimusten täyttämiseksi. Tämän takia on alettu miettimään vaihtoehtoisia polttoaineita polttomoottorikäyttöön. Yksi varteenotettava vaihtoehto on ammoniakki. Mikäli ammoniakkia haluttaisiin käyttää polttomoottorin polttoaineena, moottoriin täytyisi tehdä muutoksia. Tämä johtuu puhtaasti ammoniakkiin liian hitaasta palamisesta. On tutkittu mm. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) teknologian käyttämistä. Tällä teknologialla saadaan parannettua hyötysuhdetta jopa 40–50 % monilla eri puristussuhteilla (40:1 – 100:1). Mikäli ammoniakki hajotetaan ennen sylinteriin ruiskutusta, sen sekoitus vedyn ja tyypin ja ilman kanssa saa sen palamisen muistuttamaan bensiiniä. Näin sitä voidaan käyttää tavallisissa polttomoottoreissa. HCCI-menetelmässä kaasuseos sekoitetaan ennen sen syöttämistä palotilaan, minkä jälkeen hyvin sekoitettu seos syttyy itsestään sylinterissä korkeassa paineessa. Tässä menetelmässä yhdistyvät diesel- ja ottomoottorin ominaisuudet. (Zamfirescu ja Dincer 2008a, 460.)

### **4.2 Ammoniakin varastointi**

Ammoniakin säilytykseen merenkulun polttoaineena ei ole vielä olemassa säädöksiä eikä määräyksiä. Ammoniakin varastoinnista ja kuljettamisesta on kuitenkin olemassa kokemusta ja tutkimuksia sen ollessa maailman eniten käytetty kemikaali. Jotta varastoinnista merenkulussa saataisiin turvallista ja edullista, on kehiteltävä uusia ratkaisuja. Yksi vaihtoehto olisi käyttää menetelmää, jossa ammoniakki imeytettäisiin huokosiin metalliamiinikomplekseihin, esimerkiksi heksaamiinimagneesikloridiin ( $\text{Mg}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_2$ ). Tämä imeytysprosessi voidaan tehdä normaalissa huonelämpötilassa. Koska prosessi on täy-

sin palautettavissa, ammoniakki voidaan vapauttaa käyttökohteessa metalliamiinikomplekseista ja ottaa käyttöön. Tällä tekniikalla voitaisiin varastoida ammoniakkia aluksissa ja siten estää onnettomuuksista syntyviä vaaratilanteita. (Zamfirescu and Dincer 2008a, 460.)

Ammoniakkia voidaan varastoida myös nestemäisessä muodossa  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Koska ammoniakki on biohajoavaa, ei siitä aiheudu ympäristölle merkittävää vaaraa mahdollisen vuodon sattuessa. Ammoniakin sekoittuessa meriveteen, se myös laimenee hyvin nopeasti tehden siitä turvallisen vaihtoehdon. Samaa ei voi sanoa öljyvuodoista, joiden vaikutusaika voi olla vuosikymmeniä tai jopa vuosisatoja. (Bicer ja Dincer 2018, 4585.)

### **4.3 Ammoniakin jakelu**

Ammoniakkia on saatavilla jo nyt ympäri maailman. Kuten jo edellä on mainittu, sitä tuotetaan maatalouden käyttöön hyvin suuria määriä. Jopa 80 % ammoniakista rahdataan nykyisin laivoilla niiden valmistuspaikkojen läheltä alueille, joissa sitä käytetään ja tarvitaan. (Yu ja Qi 2016, 6.) Olisi varsin yksinkertaista rakentaa polttoainesatamia, joista alukset voisivat sitä tankata omiin varastotankeihinsa, näiden tuotantolaitosten läheisyyteen.

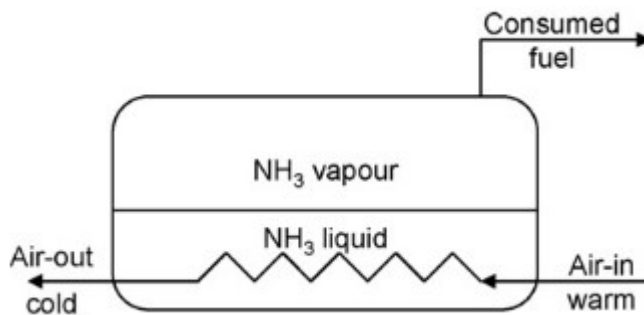
### **4.4 Ammoniakin hyödyt**

Ammoniakki on perusolemukseltaan hyvin erilaista verrattaessa polttoöljyihin, kuten raskaaseen polttoöljyyn ja meridieseliin (MDO). Öljypohjaisia polttoaineita tulee lämmittää, että ne säilyisivät käyttökuntoisina varastoidessa. Ammoniakki taas on hyvin kylmää sitä varastoitaessa nestemäisenä. Ammoniakin kylmentävää vaikutusta voidaankin pitää positiivisena seikkana mietittäessä sen ominaisuuksia. Kun polttoainetta voidaan käyttää samaan aikaan jäädyttämiseen, lämmittämiseen ja energian tuotantoon ja sen palamisjätteenä on ainoastaan vettä ja typpeä, voidaan puhua erinomaisesta polttoaineesta. (Zamfirescu ja Dincer 2008, 462 - 463.)

Tavanomaisesta polttoaineesta, kuten raskaasta polttoöljystä, saadaan otettua hyötykäyttöön myös pakokaasun lämpöenergia. Tämä on mahdollista myös ammoniakkia käytettäessä. Pakokaasut johdetaan pakokaasukattilaan, jolla tuotetaan höyryä tai kuumaa vettä. Tätä höyryä tai vettä voidaan käyttää

aluksen laitteistojen ja asuintilojen lämmittämiseen. Esimerkiksi arktisilla ja kylmillä alueilla seilaavat laivat tarvitsevat paljon lämmitystä. Tällä saadaan asuintilat asumiskelvollisiksi ja määräysten mukaisiksi. Konehuoneen erilaiset laitteet tarvitsevat myös paljon lämmitystä. Näistä mainittakoon voiteluaineet, sekä separaattorit, joilla voiteluaineita puhdistetaan.

Nestemäisen ammoniakkin kylmä (-33 °C) (Optimisation 2019) varastointilämpötila antaa yhden lisäedun tavanomaisiin polttoaineisiin nähden. Polttoainetankin sisälle johdettavalla lämmönvaihtimella pystyttäisiin ottamaan hyötykäyttöön nesteen jäähdyttävä vaikutus (Kuva 4). Tätä jäähdytettyä ilmaa voitaisiin käyttää esimerkiksi asumistilojen jäähdyttämiseen.



Kuva 4. Lämmön talteenotto nestemäisestä ammoniakista (Zamfirescu ja Dincer 2008)

## 5 NESTEYTETTY MAAKAASU (LNG)

Tämän hetken puhutuin ja käytetyin uusiutuva polttoaine merenkulussa on nesteytetty maakaasu (LNG). Jos LNG tuotetaan käyttäen uusiutuvia lähteitä, voidaan siitä käyttää nimitystä BIO-LNG.

Nesteytettyä maakaasua saadaan aikaiseksi jäähdyttämällä maakaasu -162 celsiusasteeseen, jolloin siitä tulee nestettä normaalissa ilmanpaineessa. Jäähdytyksessä maakaasun tilavuus pienenee suhteessa 1:600. Tässä lämpötilassa sitä voidaan kuljettaa säiliöissä käytettäväksi polttoaineena. LNG (taulukko 1.) on parafiininen sekoite, joka sisältää pääasiassa metaania, etaanina, propaania ja butaania. Lisäksi se sisältää valmistustavasta riippuen pieniä määriä iso-butaania, pentaania, iso-pentaania ja typpeä. (Kumar ym. 2011, 4265.)

Taulukko 1. Maakaasun koostumus

| Kaasun nimi  | Kemiallinen kaava                | Osuus (%) |
|--------------|----------------------------------|-----------|
| Metaani      | CH <sub>4</sub>                  | 89,63     |
| Etaani       | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>    | 6,32      |
| Propaani     | n-C <sub>2</sub> H <sub>8</sub>  | 2,16      |
| Butaani      | n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 1,20      |
| Iso-Butaani  | i-C <sub>4</sub> H <sub>12</sub> | 0,00      |
| Pentaani     | n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,00      |
| Iso-Pentaani | i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 0,00      |
| Typpi        | N <sub>2</sub>                   | 0,69      |

Vaikka BIO-LNG on uusiutuva energianlähde ei tule sivuuttaa sitä tosiasiaa, että se sisältää hiiltä. Tämä tekee siitä saastuttavan. Kuten Pavlenko ja muut esittävät, on syytä huomioida se, että vaikka LNG:n käyttöä on esitetty tärkeimmäksi välineeksi Pariisin sopimuksen velvoitteiden täyttämiseen, LNG-kaasun siirroissa tapahtuvat vuodot voivat vaikeuttaa näiden tavoitteiden saavuttamisen, tai tehdä jopa sen mahdottomiksi. (Pavlenko ym. 2020, 4.)

On esitetty arvioita, että jopa 3 % luonnonkaasujen vuotamisista metaanipäästöistä (CH<sub>4</sub>) tapahtuisi kaasunporauksen ja kaasun käytön välillä. Siitä valtaosa, eli 2,4 %:n osuus johtuisi pelkästään jakelujärjestelmän osuudesta, ja loppu 0,6 % jäisi tankkauksen ja itse hyötykäyttäjän moottorin osalle. Tämä perustuu amerikkalaisen ympäristönsuojeluyhdistyksen Environmental Protection Agency:n (EPA) vuonna 2012 tekemään arvioon. (Alvarez ym. 2012, 6435 - 6436.) Tässä arviossa ei ole huomioitu merenkulun liikenteen osuutta, vaan on keskitytty kaasuautojen käyttämisestä johtuviin vuotoihin.

Meriliikenteen osalta on esitetty arvioita, että käytettäessä 20 vuoden mallia arvioimaan kasvihuonekaasujen vähennyksen saavuttamisen kiireellisyyttä,

jotta saavutettaisiin IMO:n vaatimukset, ja otettaessa huomioon päästöt apujärjestelmissä ja kampikammoiden vuodoissa käytettäessä matalapaineisia järjestelmiä, ei maakaasun käytöllä saavuteta mitään ympäristöllisiä hyötyjä, moottoritekнологiaan katsomatta. Tuotannosta aiheutuvien päästöjen vuoksi LNG saastuttaa jopa enemmän, kuin tavanomaiset polttoaineet. Näitä päästöjä ovat erityisesti liuskekaasun erottelussa, prosessoinnissa ja kuljetuksessa aiheutuvat vuodot. (Pavlenko ym. 2020 7 - 11.)

## **6 KEHITTEILLÄ OLEVIA PROJEKTEJA**

Ammoniakin potentiaali on huomattu myös teollisuudessa ja eri tahoilla on parhaillaan käynnissä tutkimushankkeita ja testiohjelmaa ammoniakin valjastamiseksi tulevaisuuden merenkulun polttoaineeksi.

### **6.1 Wärtsilä**

Suomalainen laivamoottorien valmistaja Wärtsilä on aloittanut testiohjelman, jonka tarkoituksena on tutkia ammoniakin käyttöä polttomoottoreissa. Tällä testiohjelmalla pyritään valmistautumaan ammoniakin käyttöön tulevaisuuden polttoaineena. Ensimmäisissä testeissä ammoniakkia ruiskutettiin polttokammioon, jossa saatiin mitattua ammoniakin palamista. Testien perusteella yhtiö voi aloittaa seuraavan vaiheen koeajot, joissa ammoniakkia käytetään kaksoispolttoainemoottoreissa ja kipinäsytykkeisissä moottoreissa. Wärtsilä aikoo aloittaa kentällä tehtävät testaukset yhteistyökumppanien kanssa vuonna 2022. Yhtiöllä on tarkoituksena suunnitella kokonaisia ammoniakkiin pohjautuvia järjestelmiä. Nämä järjestelmät tulisivat käsittämään moottorit, polttoaineen syötön ja varastoinnin. Yhtiö on jo aloittanut yhteistyön varustamoiden, laivanrakentajien, luokituslaitosten ja polttoainevalmistajien kanssa, lehtitiedotteessa kerrotaan. (Wärtsilä 2020.)

## 6.2 MAN energy solutions

Teknologia ei ole vielä aivan valmis ammoniakkin käyttämiseksi ainoana polttoaineena polttomoottoreissa. Tästä syystä on järkevää rakentaa aluksi kaksoispolttoainemoottoreita. Näissä koneissa voidaan valita käytettävä polttoaine. Esimerkiksi ammoniakki ja maakaasu. Valintaan vaikuttaa esimerkiksi polttoaineen saatavuus aluksen liikennealueen johdosta.

MAN Energy Solutions suunnittelee julkaisevansa ensimmäisen kaksoispolttoainekoneensa vuonna 2022. Tässä moottorityypissä on tarkoitus käyttää vaihtoehtoisina polttoaineita nestekaasua ja ammoniakkia. (Parker 2019.)

## 6.3 Daewoo Shipbuilding & Engineering

Myös Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering (DSME) katsoo, että ammoniakki voisi olla hyvä vaihtoehto laivan polttoaineena hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Siksi DSME on suorittanut tutkimuksia ammoniakista laivojen polttoaineena. Daewoon tavoitteena oli vertailla ammoniakkia HFO:hon ja LNG:hen ammoniakkin teknisen ja taloudellisen analyysin avulla.

DSME:n tutkimuksessa verrattiin ja analysoitiin, olisiko HFO, nesteytetty maakaasu vai  $\text{NH}_3$ , hyvä vaihtoehto merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Siinä tutkittiin myös se, mitkä polttoaineet olisivat kilpailukykyisempiä riippuen aluksen tyypistä, polttoaineen hinnasta, reitistä, varastomenetelmästä ja säiliömateriaalista. DSME tutki myös teknisiä ongelmia ja vaihtoehtoja ammoniakikäyttöisten alusten järjestelmissä.

DSME suoritti tutkimuksen saadakseen alustavan teknisen ja taloudellisen analyysin ammoniakista polttoaineena verrattuna raskaaseen polttoöljyyn ja nesteytettyyn maakaasuun. Tämän tutkimuksen tulokset viittaavat siihen, että ammoniakki voisi olla laivojen taloudellinen polttoaine, jos ammoniakilla on kilpailukykyinen hinta. Tämä voitaisiin saavuttaa vähentämällä ammoniakkin tuotantokustannuksia ja raaka-aineita. Jos IMO soveltaisi lähitulevaisuudessa tiukempaa päästölainsäädäntöä aluksiin, ammoniakkin kilpailukyky laivan polttoaineena voisi lisääntyä dramaattisesti. Jos ammoniakkia varten toteutettaisiin tarvittavat infrastruktuurit suuriin kansainvälisiin satamiin, ammoniakkin aika-



kausi alusten polttoaineena voitaisiin toteuttaa odotettua nopeammin. Ammoniakkiaikakauden valmistelemiseksi DSME aikoo laajentaa teknologiaansa ja liiketoimintaansa kaupallisten alusten ammoniakkitekniikkaan ja -järjestelmiin, jotka perustuvat esimerkiksi ylimmän tason kryogeenitekniikkaan ja aikatauluihin, etenkin laivojen LNG- ja nestekaasujärjestelmissä. (Kwon ym. 2019.)

## 7 POHDINTA

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ammoniakin ominaisuuksia ja mahdollisuuksia polttoaineena merenkulussa. Tutkimus oli luonteeltaan kirjallisuuskatsaus. Aineistona käytettiin Google Scholar - ja Science Direct -tietokannoista löytyviä raportteja ja tutkimuksia. Tietoa haettiin lisäksi Kaakkois-suomen ammattikorkeakoulun kirjaston Kaakkuri - tietokannasta. Avainsanoina käytettiin muun muassa ammonia, LNG, internal combustion engine, maritime pollution ja Paris agreement. Koska suurin osa lähdemateriaalista oli englanninkielistä kirjallisuutta, kaikki termit ja käsitteet on käännetty suomeksi tämän tekijän toimesta, ellei näille termeille ollut jo vakiintunutta käännettä.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin, voiko ammoniakkia käyttää tulevaisuudessa merenkulun polttoaineena, jotta saavutettaisiin Pariisin ympäristönkokouksessa merenkululle asetetut tavoitteet vuodelle 2050. Tämä Pariisin ilmastopöytäkirja on sopimus, jossa allekirjoittajavaltiot sekä Euroopan Unioni (EU) ovat sopineet niistä toimenpiteistä, joiden tavoitteina on saavuttaa hiilivapaa teollisuus vuoteen 2050 mennessä. Tämä tarkoittaa hiilidioksidipäästöjen neutralisointia. Hiilidioksidipäästöjen neutralisointi tarkoittaa sitä, että hiilipäästöt täytyy saada vastaamaan hiilen käyttöä ja varastointia maaperään, kasvistoon ja vesistöihin. Jotta tässä onnistuttaisiin, koko maailman on sitouuttava tekemään parhaansa sen saavuttamiseksi. (Paris Agreement 2015.)

Tässä tutkimuksessa tutkittiin aluksi ammoniakin valmistusta. Todettiin, että ammoniakki on tällä hetkellä maailman eniten valmistettu kemikaali, koska sitä käytetään kaikkialla maailmassa muun muassa maatalouden lannoitteissa. Tällä hetkellä ammoniakkia tuotetaan lähes yksinomaan Haber-Bosch-menetelmäksi kutsutulla tavalla. (Pattabathula ja Richardson 2016.) Tässä menetelmässä on havaittavissa jo alkuvaiheessa merkittävä ongelma ympäristön kan-

nalta. Menetelmässä käytetään hiiliyhdisteitä sisältävää maakaasua tai luonnonkaasua ammoniakkin valmistamiseksi, joka tekee siitä uusiutumaton energiaa. Näin ollen tältä kannalta tarkasteltuna tällä tavalla tuotettu ammoniakki ei ole riittävän puhdasta täyttämään Pariisin ilmastososopimuksessa asetetut tavoitteet.

Haber-Bosch-menetelmän rinnalla tutkittiin elektrokemiallinen synteeksi kutsuttua ammoniakkin valmistusmenetelmää. (Kyriakou ym. 2017). Tämän työn kannalta positiivisimmaksi asiaksi löydettiin sen päästötön valmistusprosessi käytettäessä uusiutuvia energiamuotoja kuten aurinko- tai tuulienergiaa tarvittavan sähkön tuottamiseen. Elektrokemiallinen synteesi voisi olla paras tapa tuottaa ammoniakkia tulevaisuudessa merenkulun käyttötarpeisiin sen ollessa tarvittaessa täysin puhdas valmistusmenetelmä. Ongelmana saattaa olla kalliit investointikustannukset aurinko- tai tuuliteknologiaan Haber-Bosch-menetelmään verrattaessa.

Seuraavaksi tässä tutkimuksessa tutustuttiin ammoniikkiin sekä kemiallisena yhdisteenä että polttomoottorin polttoaineena. Ammoniakin todettiin olevan kaikkialla luonnossa esiintyvä, suurina määrinä myrkyllinen ja kuvottavan hajuinen kaasu. Jotta ammoniakkia voitaisiin käyttää merenkulun polttoaineena, täytyy ratkaista vähintään kolme siihen liittyvää aihetta. Nämä kolme asiaa ovat ammoniakkin polttomoottorin sopivuus ammoniakille, ammoniakkin varastointi ja sen jakelu.

Havaittiin, että mikäli ammoniakkia haluttaisiin käyttää polttomoottorin polttoaineena, moottoriin täytyisi tehdä muutoksia. Tämä johtuu puhtaan ammoniakkin liian hitaasta palamisesta. Esimerkiksi HCCI kutsuttua teknologiaa käyttämällä saadaan parannettua hyötysuhdetta jopa 40 – 50 % monilla eri puristussuhteilla (40:1 – 100:1). Menetelmässä ammoniakki hajotetaan ennen sylinteriin ruiskutusta, jonka jälkeen se sekoitetaan vedyn ja typen ja ilman kanssa saaden sen palamisen muistuttamaan bensiiniä. (Zamfirescu ja Dincer 2008a, 460.) Kaasuseos johdetaan lopuksi sylinteriin missä se syttyy itsestään korkean paineen ansiosta. Näin sitä voitaisiin käyttää tavallisissa polttomoottoreissa. Tämä teknologia olisi oletettavasti helppo toteuttaa ilman valtavia investointeja moottorivalmistajilta.

Kun tutkittiin ammoniakkin varastointia merenkulussa, havaittiin, ettei ole olemassa vielä säännöksiä eikä määräyksiä. Koska ammoniakkaa käytetään valtavia määriä mm. lannoiteteollisuudessa, on sitä varten jo olemassa erittäin hyviä ja varteenotettavia ratkaisuja varastointia ajatellen. Merenkulun kannalta tämä on erittäin positiivinen asia. Näitä olemassa olevia ratkaisuja voitaisiin soveltaa erittäin helposti myös merenkulussa aiheuttamatta suuria kustannuksia ja investointeja säiliöiden suunnittelussa ja määrittelyssä.

Kun tutkittiin ammoniakkin sopivuutta merenkulun polttoaineeksi jakelun kannalta, havaittiin, että sitä on nykyään saatavilla ympäri maailman. Merenkulku hoitaa jopa 80 % ammoniakkin rahtaamisesta. (Yu ja Qi 2016, 6.) Jo olemassa olevaan infrastruktuuriin saattaisi olla helppo suunnitella jakeluasemia ammoniakkin polttoaineena käyttämistä varten. Toisaalta ammoniakkin tuotanto on mitoitettu lannoitetarvetta ajatellen ja mikäli merenkulku alkaisi käyttämään sitä polttoaineena, pitäisi rakentaa uusia ammoniakkin tuotantolaitoksia. Näitä laitoksia voisi rakentaa merenkulun liikenteen kannalta merkittäviin kohtiin.

Seuraavaksi tutkittiin mitä hyötyjä ammoniakista voisi olla verrattaessa sitä nykyaikaisiin merenkulun polttoaineisiin, kuten raskaaseen polttoöljyyn tai matalarikkiseen polttoöljyyn. Kenties merkittävimäksi ja parhaaksi hyödyksi ammoniakkin puolesta osoittautui sen kylmä varastointilämpötila. (Zamfirescu ja Dincer 2008a, 462–463.) Raskasöljyn ja dieselin lämmitys vaatii jatkuvaa lämmitystä satamissa ja merellä. Tämä kallis ja energiaa kuluttava investointi voitaisiin jättää kokonaan pois. Höyrykattiloiden koko voitaisiin pienentää murtoosaan nykyisestä polttoöljyn lämmitystarve poistamalla. Kenties pakokaasusta talteen otettavaa lämpöä voitaisiin käyttää esimerkiksi lämpövaraajien lämmittämiseen. Näitä varaajia voitaisiin käyttää satamissa hyttien ja sisätilojen lämmittämiseen. Kaiken lisäksi ammoniakkin kylmää varastointilämpötilaa voitaisiin käyttää hyödyksi sisätilojen jäähdytyksessä johtamalla ilma menemään läpi polttoainetankkien sisälle sijoitettuihin lämmönvaihtimiin. Tällä menetelmällä voisi ilmastointikompressorien asentaminen kokonaan pois rakennusvaiheessa. Ilmastointilaitteissa olevat kylmäaineet ovat saastuttavia kemikaaleja, joten edellä mainitulla lämmönvaihdinmenetelmällä saataisiin parannettua ympäristöystävällisyyttä entisestään.

Tutkimuksen seuraavassa vaiheessa tutkittiin nesteytettyä maakaasua (LNG) vaihtoehtoisena polttoaineena merenkulussa. Maakaasu on nimensä mukaisesti maasta pumpattava kaasu, jonka tuotantoprosessi yksistään aiheuttaa suuria päästöjä maapallolla. (Kumar ym. 2011, 4265; Pavlenko ym. 2020, 4.) Pelkästään tämä yksittäinen syy tekee vaikeaksi keksiä perusteita tukemaan ajatusta käyttää nestemäistä maakaasua merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa ympäristön näkökulmasta. Lisäksi ei tule unohtaa tosiasiaa, että maakaasu on fossiilinen polttoaine, joka saastuttaa palaessaan. Tämän lisäksi olisi otettava huomioon koneiden apujärjestelmissä ja kampikammioissa aiheutuvat vuodot. Maakaasun käytöllä ei saavutettaisi mitään ympäristöllisiä hyötyjä moottoritekнологiaan katsomatta. (Pavlenko ym. 2020, 7–11.)

Tutkimuksessa siirryttiin seuraavaksi ottamaan selvää moottorivalmistajien suhtautumisesta ammoniakkiin. (Kwon ym. 2019; Parker 2019; Wärtsilä 2020). Havaittiin kolmen merkittävän laivamoottorien valmistajan, Wärtsilän, DSME ja MAN Energy Solutionsin olevan kehittämässä ammoniakilla toimivia laivamoottoreita. Moottorivalmistajista kaksi, Wärtsilä ja MAN, ovat ilmoituksensa mukaan valmiita aloittamaan ammoniakikäyttöisen laivamoottorin kenttätestetit jo seuraavien parin vuoden aikana. Mikäli moottorivalmistajat saisivat toimivat konseptit suunnitelluissa aikatauluissa koeajovaiheisiin, olisi kemianteollisuudella syytä alkaa suunnittelemaan ammoniakkin jakeluun polttoaineeksi tarkoitettua infrastruktuuria. Tämä mahdollistaisi ammoniakkin saatavuuden mahdollisesti jo lähitulevaisuudessa.

Tässäkin tutkimuksessa on omat puutteensa. Ensiksi, tutkimus oli luonteeltaan kirjallisuuskatsaus, ei kuitenkaan systemaattinen kirjallisuuskatsaus. Näin ollen tutkitusta aineistoista saattoi jäädä oleellisiakin aineistoja löytämättä. Tutkimuksen kannalta oleellimmat kohdat tulivat kuitenkin esille. Toiseksi, tutkittua aineistoa oli suhteellisen rajoitettu määrä. Tämä tutkimus oli luonteeltaan esiselvitys ja aihealue pyrittiin pitämään mahdollisimman suppeana. Kolmanneksi, haetut tutkimukset perustuivat enimmäkseen teoreettisiin arvioihin ja koemittakaavan esimerkkeihin, joten käytännön esimerkkien käyttäminen oli rajoitettua. Neljänneksi, työn ollessa kirjallisuuskatsaus, asiantuntijoiden lausunnot, joilla voisi saada uusia näkökulmia ja ideoita, puuttuvat työstä kokonaan.

Tämän tutkimuksen aihetta, ammoniakkin käytöstä merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa, oli tärkeää tutkia mahdollisimman pian, koska merenkulussa aluksia käytetään yleisesti yli 30 vuotta. Näin ollen tänään rakennetut laivat voivat olla vielä ajossa, kun Pariisin ilmastopimuksessa allekirjoitetut sopimukset astuvat voimaan. Polttoaineen valinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi merenkulun päästöihin. Ammoniakki on tämän tutkimuksen perusteella yksi erittäin hyvä vaihtoehto tulevaisuudessa merenkulun polttoaineena.

## 8 YHTEENVETO

Tutkimuksen tarkoituksena oli esiselvittää ammoniakkin käytettävyyttä merenkulun polttoaineena tulevaisuudessa, että Pariisin ilmastopimuksen asettamat ehdot täytyisivät sopimuksen astuessa voimaan vuonna 2050. Tutkimus tehtiin kirjallisuuskatsauksena hakemalla raportteja ja tutkimuksia Google Scholar – ja Science Direct tietokannoista käyttäen apuna Kaakkoissuomen Ammattikorkeakoulun kirjaston Kaakkurin hakukonetta.

Tutkimuksessa tutkittiin ammoniakkin valmistusta, varastointia ja jakelua sekä sen käyttöä polttomoottoreissa. Tutkimuksen perusteella voitaneen todeta, että ammoniakki olisi vaivatonta ottaa yleiseen käyttöön merenkulun polttoaineena lisäämällä ammoniakkin valmistusta elektrokemiallisella synteisillä sekä rakentamalla jakeluasemia satamiin. Moottorivalmistajat ovat aloittaneet omat toimenpiteensä moottorien muuntamiseksi ammoniakille sopiviksi. Tutkimuksen perusteella nesteytetyllä maakaasulla ei saavutettaisi ilmastopimuksen vaatimuksia sen tuotannon, siirron ja käytön aikana aiheutuvien vuotojen saastuttavuuden vuoksi.

Polttoainevalinnoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi merenkulun päästöihin. Tämän tutkimuksen perusteella ammoniakki olisi erittäin hyvä vaihtoehto tulevaisuudessa merenkulun polttoaineena.

Työn tekeminen osoittautui todella mielenkiintoiseksi ja samaan aikaan haasteelliseksi. Haasteita toivat erityisesti englanninkielisten tutkimusten ja raporttien tulkitseminen sekä aihealueen pitäminen riittävän suppeana.

## 9 LÄHTEET

Alvarez, R., Pacala S., Winebrake J., Chameides W. & Hamburg S. 2012. Greater focus needed on methane leakage from natural gas infrastructure, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(17), 6435–6440. Verkkolehti. Saatavissa: [10.1073/pnas.1202407109](https://doi.org/10.1073/pnas.1202407109). [Viitattu 20. huhtikuuta 2020].

Ammonia Market. 2019. Market Research by Latest Business Opportunities, Industry Share, Top Manufacturer, and Global Market Insight Forecast to 2024 - *MarketWatch*. 2019. Artikkel. Saatavissa: <https://www.marketwatch.com/press-release/ammonia-market-2019-market-research-by-latest-business-opportunities-industry-share-top-manufacturer-and-global-market-insight-forecast-to-2024-2019-06-06> [Viitattu: 17.3.2020].

Toxicological Profile for Ammonia. 2004. ATSDR. PDF-dokumentti Saatavissa: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp.asp?id=11&tid=2>. [Viitattu: 7.4.2020].

Bañares-Alcántara, R., Dericks G., Fiaschetti M., Grünwald P., Lopez J., Tsang E, Yang A, Ye L. & Zhao S. 2015. Analysis of Islanded NH<sub>3</sub>-based Energy Storage Systems Analysis of Islanded Ammonia-based Energy Storage Systems. University of Oxford. PDF-dokumentti. Saatavissa: [http://www2.eng.ox.ac.uk/systemseng/publications/Ammonia-based\\_ESS.pdf](http://www2.eng.ox.ac.uk/systemseng/publications/Ammonia-based_ESS.pdf) [Viitattu: 3.4.2020].

Bicer, Y. & Dincer, I. 2018. Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation 2018, *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 43(9), 4583–4596. PDF-dokumentti. Saatavissa: [10.1016/j.ijhydene.2017.07.110](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.110). [Viitattu: 3.10.2019].

European Parliament. 2019. What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?. European Parliament. WWW-dokumentti Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>. [Viitattu: 27.4.2020].

Hu, Q., Zhou, W. & Diao, F. 2019. Interpretation of Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, *Ship Building of China*, 60(1), 195–201. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mendeley.com/catalogue/interpretation-initial-imo-strategy-reduction-ghg-emissions-ships/> [Viitattu: 10.12.2019].

Kobayashi, H., Hayakawa A., Kunkuma K., Somarantne A. & Ekenechukru C. 2019. Science and technology of ammonia combustion, *Proceedings of the Combustion Institute*. PDF-dokumentti. Saatavissa: [10.1016/j.proci.2018.09.029](https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029). [Viitattu: 3.4.2020].

Kumar, S., Kwon H.-T., Choi K-H., Lim W., Cho H., Tak K. & Moon I. 2011. LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. Elsevier. PDF-dokumentti. Saatavissa: [10.1016/j.apenergy.2011.06.035](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.035). [Viitattu: 17.4.2020].

Kwon, H., Ryu, M. & An, S.-K. 2019. Technical & Economic Study for Commercial Ships with HFO, LNG and NH<sub>3</sub> As Fuel. *AIChE Annual Meeting*. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://aiche.confex.com/aiche/2019/meetingapp.cgi/Paper/560817>. [Viitattu: 3.3.2020].

Kyriakou, V., Garagounis E., Vasileiou A. & Stoukides M. (2017) "Progress in the Electrochemical Synthesis of Ammonia", *Catalysis Today*. Elsevier B.V., 286, 2–13. PDF-dokumentti Saatavissa: [10.1016/j.cattod.2016.06.014](https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.06.014). [Viitattu: 10.12.2019].

Oceana. 2020. Shipping Pollution. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://eu.oceana.org/en/shipping-pollution-1> [Viitattu: 24.4.2020].

Energy experts support carbon-free ammonia as a marine fuel. 2019. Vessel performance optimisation. WWW-artikkeli Saatavissa: <https://vpoglobal.com/2019/07/27/energy-experts-support-carbon-free-ammonia-as-a-marine-fuel/> [Viitattu: 8.4.2020].

The Editors of Encyclopaedia Britannica. 2015. Paris Agreement. *Britannica*. WWW-artikkeli Saatavissa: <https://www.britannica.com/topic/Paris-Agreement-2015> [Viitattu: 24.4.2020].

Parker, S. 2019. Ammonia shapes up as a fuel of the future. *Riviera Maritime Media*. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/ammonia-shapes-up-as-a-fuel-of-the-future-57237> [Viitattu: 4.3.2020].

Pattabathula, V. & Richardson, J. 2016. Introduction to Ammonia Production. *AIChE*. WWW-artikkeli Saatavissa: <https://www.aiche.org/resources/publications/cep/2016/september/introduction-ammonia-production> [Viitattu: 4.3.2020].

Pavlenko, N. Comer B., Zhou Y., Clark N. & Rutherford D. 2020. The climate implications of using LNG as a marine fuel. International council on clean transportation. PDF-dokumentti. Saatavissa: [www.theicct.org](http://www.theicct.org) [Viitattu: 20.4.2020].

Wärtsilä (2020) Wärtsilä advances future fuel capabilities with first ammonia tests. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.wartsila.com/media/news/25-03-2020-wartsila-advances-future-fuel-capabilities-with-first-ammonia-tests-2670619> [Viitattu: 27.4.2020].

Yu, G. & Qi, X. 2016. Disruption management. United nations. PDF-dokumentti. Saatavissa: [10.1142/5632](https://doi.org/10.1142/5632). [Viitattu: 20.4.2020]

Zamfirescu, C. & Dincer, I. 2008. Using ammonia as a sustainable fuel. *Journal of Power Sources*, 185(1), 459–465. Saatavissa:



[10.1016/j.jpowsour.2008.02.097](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.02.097). [Viitattu: 3.10.2019]

## KUVALUETTELO

|   |    |
|---|----|
| Kuva 1 Ammoniakkimolekyyli .....  | 8  |
| Kuva 2 Haber-Bosch-menetelmä .....  | 9  |
| Kuva 3 Elektrokemiallinen synteesi (Kyriakou ym. 2017) .....                            | 10 |
| Kuva 4 (Lämmön talteenotto nestemäisestä ammoniakista (Zamfirescu ja Dincer 2008))..... | 13 |