

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2023

Valtteri Rautalin

TULEVAISUUDEN
LAIVAPOLTTOAINEIDEN
PALOTURVALLISUUDEN
HUOMIOINTI
SUUNNITTELUTYÖSSÄ


TURKU AMK
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

Huhtikuu 2023 | 59 sivua

Valtteri Rautalin

Tulevaisuuden laivapolttoaineiden paloturvallisuuden huomiointi suunnittelutyössä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia tulevaisuuden laivapolttoaineita ja niiden paloturvallisuutta. Tavoitteena oli nostaa esille kaasumaisten polttoaineiden paloturvallisuuden vaatimuksia sekä eroavaisuuksia. Työssä käsiteltäviä polttoaineita on kokeiltu ja käytetty menneisyydessä muilla teollisuuden aloilla aktiivisesti. Meriteollisuudelle polttoaineet ovat melko uusia tai jopa kokonaan tulevia pilotoitavia vaihtoehtoja. Työn tarkoituksena on myös toimia Deltamarin Ltd:n ohjeaineistona uusille suunnittelijoille.

Työn ajankohtaisuuden vuoksi lähdeaineistona käytettiin viime vuosien aikana julkaistuja aineistoja sekä artikkeleita. Merkityksellisimmät tahot, joiden aineistoja käytettiin, olivat laitevalmistajat, luokituslaitokset sekä pelastusalan eri tahot. Työssä käytettiin hyväksi meriliikenteen ammattilaisen haastattelua. Aiheen tiimoilta käytiin keskustelua myös Varsinais-Suomen pelastuslaitoksen sekä suunnittelualan toimihenkilöiden kanssa. Tärkeimmät aineistot olivat merenkulun yleissopimus, luokituslaitosten säännöt sekä Ova-ohjeet.

Suoritettujen tutkimusten perusteella todettiin polttoaineiden olevan hyvin erilaisia, vaikkakin niiden käytölle asetetut säännöt ovat lähes samanlaisia. Säilytyslämpötilat sekä kunkin palamiskäyttäytyminen muodostavat suurimmat eroavaisuudet polttoaineiden välillä. Työssä todettiin alan tarvitsevan uusia tutkimuksia ja selvityksiä turvallisemman tulevaisuuden takaamiseksi.

Asiasanat:

Tulevaisuuden laivapolttoaineet, paloturvallisuus, suunnittelu, alukset

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

April 2023 | 59 pages

Valtteri Rautalin

Consideration of the fire safety of future marine fuels in design work

The aim of this thesis was to investigate future ship fuels and their fire safety. The objective was to highlight the fire safety requirements and differences of gaseous fuels. The fuels discussed in the work have been tested and used actively in other industries in the past. For the marine industry, fuels are relatively new or even completely new pilot alternatives. The purpose of the thesis is also to serve as guidance for new design engineers at Deltamarin Ltd.

Due to the topical nature of the work, material published in the past few years was used as source material, including articles and publications by the most significant parties in the industry such as equipment manufacturers, classification societies, and various rescue agencies. The work also utilized an interview with a maritime professional. Discussions were held with the rescue service of Southwest Finland and design industry personnel regarding the topic. The most important materials were the Maritime Convention, the regulations of the classification societies, and Ova guidelines.

Based on the conducted research, it was found that fuels are very different, although the rules set for their use are almost the same. The storage temperatures and combustion behavior of each fuel form the greatest differences between fuels. In conclusion the industry needs new research and studies to ensure a safer future.

Keywords:

Ship fuels of the future, Fire safety, Design, Ships

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	7
1 Johdanto	8
1.1 Opinnäytetyön aihe ja tausta	8
1.2 Opinnäytetyön rajaus	9
1.3 Opinnäytetyön rakenne	9
2 Laivan vaatimuksia sääntelevät tahot	10
2.1 IMO – International Maritime Organisation	10
2.2 SOLAS – Safety of Life at Sea	11
2.3 Luokituslaitokset	12
2.4 Muut kansainväliset vaikuttavat tekijät	13
3 Polttoaineiden ominaisuudet	15
3.1 Polttoaineiden ominaisia piirteitä	15
3.1.1 Nesteytetty maakaasu	15
3.1.2 Nestekaasu	16
3.1.3 Ammoniakki	17
3.1.4 Vety	19
3.2 Polttoaineiden siirto maista laivaan	20
3.2.1 Nesteytetty maakaasu	20
3.2.2 Nestekaasu	21
3.2.3 Ammoniakki	23
3.2.4 Vety	24
3.3 Polttoaineiden varastointi	26
3.3.1 Nesteytetty maakaasu	26
3.3.2 Nestekaasu	28
3.3.3 Ammoniakki	29
3.3.4 Vety	31

4 Aktiivinen ja passiivinen palontorjunta	33
4.1 Aktiivinen palontorjunta	33
4.1.1 Palosta ja vuodoista ilmoittavat automaattiset anturit ja hälyttimet	33
4.1.2 Paloja torjuvat automaattiset järjestelmät	36
4.2 Passiivinen palontorjunta	41
4.2.1 Kalusto	41
4.2.2 Varustus	44
4.2.3 Toiminta onnettomuustilanteessa	46
5 Työn tulokset ja niiden arviointi	47
5.1 Polttoaineiden käytön analysointi	47
5.2 Työn tavoitteiden toteutuminen	50
6 Yhteenveto	52
Lähteet	54

Liitteet

Liite 1. Laivan paloturvallisuutta edistävä suunnitteluohje

Liite 2. Polttoaineiden ominaisuuksia

Kuvat

Kuva 1. M/S Viking Gracen LNG:n tankkaus AGA:n seagas aluksesta (Viking Line 2021). 20

Kuva 2. Yksi maailman ensimmäisistä, pelkästään vedyllä operoiva alus (NORLED 2022). 24

Kuva 3. M/S Viking Grace LNG-säiliöt aluksen peräkannella (Wärtsilä 2018). 27

Kuva 4. Ammoniakkisäiliö sekä säiliön liitännäkoneikko (Wärtsilä 2020). 30

Kuva 5. Vetysäiliö sekä säiliön liitännäkoneikko (Man ES 2022).	32
Kuva 6. Miehistöhytin savunilmaisoin (Rautalin 2023).	34
Kuva 7. Kiinteäksi asennettava kaasumittari (Consilium 2023).	35
Kuva 8. CO ₂ -järjestelmän laukaisun visuaalinen sekä akustinen varoitin (Rautalin 2023).	37
Kuva 9. Vesisumusuutin (water mist nozzle) (Rautalin 2023).	38
Kuva 10. Vesisumun linjasto laivan apukoneen yllä (Rautalin 2023).	39
Kuva 11. Sprinklersuutin laivan hyttitilassa (Rautalin 2022).	40
Kuva 12. Paloposti, jossa yhdistetty rantayhde sekä paloletkukaappi (Rautalin 2023).	42
Kuva 13. Laivan käytävällä sijaitseva paloposti (Rautalin 2023).	43
Kuva 14. Paineilmahengityslaite sisältäen pullon, maskin sekä selkälävyn (Dräger 2022).	44
Kuva 15. Kemikaalisuojapuku (Viking-life 2023).	45
Kuva 16. Ote laivan palovesikaaviosta.	6-58

Kuviot

Kuvio 1. IMO:n organisaatiorakenne (Class NK 2023).	10
Kuvio 2. Haber-Bosch menetelmä (Wikipedia 2023).	18
Kuvio 3. Nestekaasun tankkausvaihtoehdot maista laivaan (Rautalin 2022).	22

Taulukot

Taulukko 1. Polttoaineiden fysikaalisia ominaisuuksia. (Rautalin 2023).	59
Taulukko 2. Polttoaineiden palofysikaalisia ominaisuuksia. (Rautalin 2023).	59

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

ABS	American Bureau of Shipping
BOG	Boil off gas
CII	Carbon Intensity Indicator
DNV	Det Norske Veritas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEXI	Energy Efficiency Existing Ship Index
FSS Code	Fire Safety Systems Code
GHG	Green House Gases (kasvihuonekaasut)
GVU	Gas Valve Unit (kaasuventtiiliyksikkö)
HFO	Heavy fuel oil (raskaspolttoöljy)
IGF Code	International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low Flashpoint Fuels
IMO	International Maritime Organisation (Kansainvälinen merenkulkujärjestö)
LFL	Low flashpoint liquid (matalan leimahduspisteen neste)
LNG	Liquefied Natural Gas (nesteytetty maakaasu)
LPG	Liquefied Petroleum Gas (nestekaasu)
MARPOL	The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MDO	Marine diesel oil (kevytpolttoöljy)
MIRG	Maritime Incident Response Group
MSC	Maritime Safety Committee
PPM	Parts Per Million

1 Johdanto

1.1 Opinnäytetyön aihe ja tausta

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia kansainvälisen laivaliikenteen uusien polttoaineiden paloturvallisuutta. Tulevaisuuden tiukentuvien päästövaatimusten nojalla uusien matala- sekä nollapäästöisten polttoaineiden kehitystyö on jo alkanut. Tavoitteena on tutkia uusien vaihtoehtoisten polttoaineiden vaikutusta laitteiden ja palontorjunnan välineiden sijoitteluun sekä tämän tiedon hyödyntämistä suunnittelussa. Tarkoituksena on myös nostaa esille keskeisiä asioita paloturvallisuuteen liittyen sekä antaa näkökulmaa riskeihin ja niiden torjumiseen. Työssä tarkasteltavia polttoaineina ovat ammoniakki, vety, nestekaasu sekä nesteytetty maakaasu.

Työn toimeksiantajana toimi meriteknisen alan suunnittelun, konsultoinnin ja rakentamisen tukipalveluja tarjoava Deltamarin Ltd. ja työ suoritettiin yrityksessä ammattiharjoittelun yhteydessä. Yritys tarjoaa suunnittelupalveluja useille eri alustypeille aina sukellusveneistä risteilyaluksiin. Yrityksen tavoitteena on kestävä kehityksen ratkaisujen kehittäminen tulevaisuuden meriliikenteeseen.

Opinnäytetyön suunnitteluvaiheessa jo ennen virallisen aiheen valintaa allekirjoittaneelle heräsi mielenkiinto yhdistää tuleva ammatti sekä pitkäaikainen harrastus. Jo varhaisessa vaiheessa oli tavoite käsitellä jotain tulevaisuuden polttoaineisiin liittyvää, kirjoittajan oman ammattitaidon kehittämiseksi.

Maailman kaupankäynnistä noin 80 % kuljetetaan meriteitse, kun mittauksena käytetään rahdin tilavuutta. Rahallisesti noin 70 % maailmankaupasta kulkeutuu meriteitse. Tulevaisuuden ennusteina on esitetty tilannetta, jossa nämä luvut tulevat entisestään kasvamaan. (UNCTAD 2022.) Kansainvälisten tutkimusten tuloksena laivaliikenne tuottaa vain pienen osan maailman päästöistä, kun niitä verrataan kuljetetun rahdin määrään. Tämä johtuu merirahdin suuren kuljetuskapasiteetin tuomasta edusta. Tosiasia on kuitenkin se, että suurin osa laivoista käyttää edelleen ilmastomuutosta kiihdyttäviä polttoaineita kuten raskasta polttoöljyä. (Greene 2023.)

1.2 Opinnäytetyön rajaus

Opinnäytetyön rajauksen ohjenuorana on käytetty toimeksiannon tarkoitusta käsitellä aihetta suunnittelijan ohjeaineistona. Työ rajataan käsittelemään vaihtoehtoisten polttoaineiden paloturvallisuutta koneiden ja laitteiden rajapinnassa. Työstä on rajattu pois rakenteellinen paloturvallisuus sekä tulipalon aiheuttamat vauriot teräsrakenteisiin aihealueen laajuuden vuoksi. Polttoaineita käsitellään työssä yleisellä tasolla, eikä näin ollen sidottuna tiettyyn alustyyppiin.

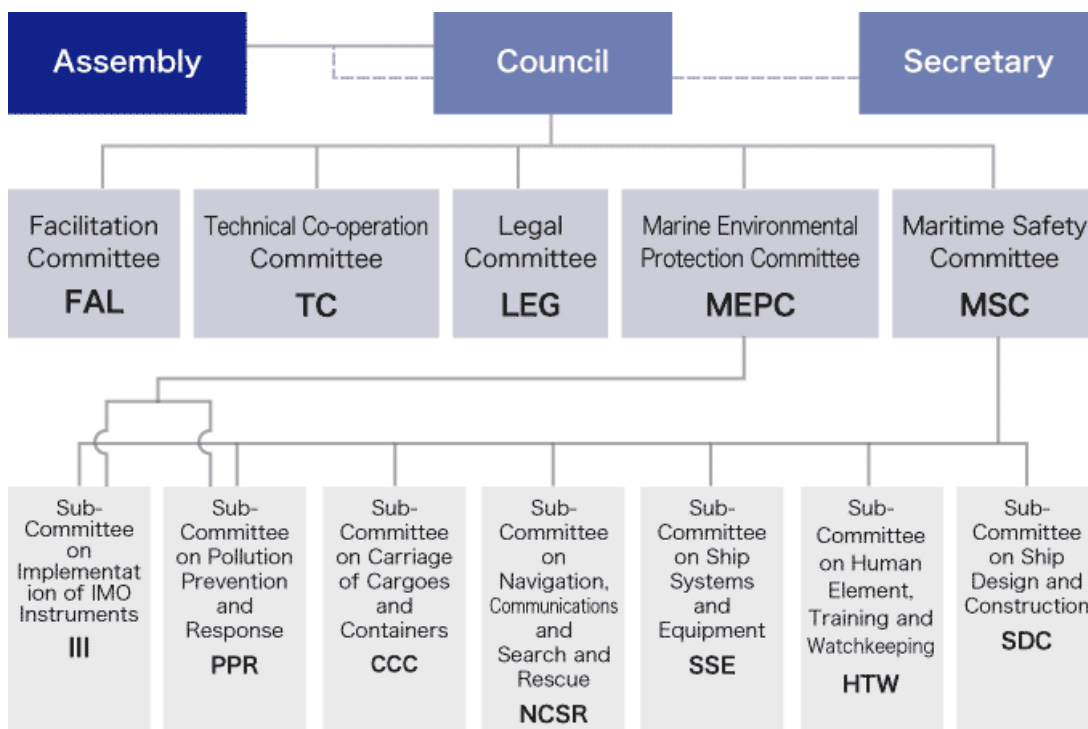
1.3 Opinnäytetyön rakenne

Työn toisessa kappaleessa käsitellään kansainvälisiä sääntöjä ja säädöksiä sekä niistä vastaavia organisaatioita. Kolmas kappale käsittelee työn polttoaineita sekä niiden soveltamista laivakäytössä. Neljännessä kappaleessa käsitellään itse paloturvallisuutta ja palontorjuntaa. Viidennessä kappaleessa kootaan yhteen työn aikana käsitellyjä asioita sekä havainnoituja ongelmakohtia ja analysoidaan näitä. Kuudennessa kappaleessa käsitellään työn kokonaisuutta sekä pohditaan mahdollisia jatkotutkimuksia aihealueen tiimoilta.

2 Laivan vaatimuksia sääntelevät tahot

2.1 IMO – International Maritime Organisation

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on vuonna 1948 perustettu Yhdistyneiden kansakuntien alaisuudessa toimiva järjestö, joka toimii merenkulun turvallisuutta hallinnoivana kattojärjestönä. Järjestön tavoitteina on luoda turvallinen sekä ympäristöystävällinen merenkulun ympäristö. Järjestöön kuuluu yhteensä 170 jäsenmaata ympäri maailman. Järjestön toiminta jakautuu viiteen komiteaan, jotka kukin vastaavat omasta erikoisalueestaan. Komiteoiden alaisuudessa toimii myös seitsemän alakomiteaa, jotka tukevat ylempien toimintaa ja pyrkimyksiä. IMO:n tehtäviin kuuluu yleissopimuksien solmiminen sekä olemassa olevien sopimusten päivittäminen. (IMO 2023.)



Kuvio 1. IMO:n organisaatorakenne (Class NK 2023).

Kuviossa 1 esitetystä organisaatorakenteesta Maritime Safety Committee oli työn näkökulmasta keskeisessä roolissa säätöjä sekä lausuntoja tutkiessa. Komitea vastaa Solas sopimuksen päivityksestä ja näin ollen myös paloturvallisuuden kehittämisestä. Komitea huolehtii myös kansainvälisen ammattimerenkulkijan turvallisuuskoulutuksen (STCW) sisällöstä sekä vaatimuksista. (IMO 2023.)

2.2 SOLAS – Safety of Life at Sea

Safety of Life at Sea (SOLAS) on kansainvälinen merenkulun yleissopimus ihmishenkien turvaamiseksi merialueilla. Sopimuksen allekirjoittamien maiden tulee noudattaa sopimuksessa asetettuja vaatimuksia sekä sääntöjä. SOLAS asettaa vaatimukset alusten rakentamiselle, operoinnille sekä laitteille ja järjestelmille. Solas-sopimuksen ensimmäinen versio luotiin RMS Titanicin uppoamisen johdosta vuonna 1914. Sopimuksen tarkoitus on kautta historian pysynyt samana; tavoitteena luoda turvallisempi merenkulun ympäristö kaikille merialueilla operoiville aluksille. (IMO 2023.)

Yleissopimus kattaa laajan kirjon sääntöjä aluksen erilaisiin osa-alueisiin, kuten työssä käsiteltävään paloturvallisuuteen. Sopimuksen kappale II-2 käsittelee erityisesti työssä käsiteltyjä paloturvallisuuden aihealueita. Kappaleen alaisuuteen kuuluu alaosioita, joita ovat muun muassa palonkehityksen ehkäisy, palon sammutus sekä operoinnille asetetut vaatimukset. (Part B, Part C & Part E.) Edellä mainittujen osioiden alaisuudesta löytyy vielä tarkennetut määräykset aihealueittain. (Regulations.) Työlle olennaisimpia määräyksiä ovat: palon havainnointi ja hälytys sekä palon sammutus. (Regulations 7 & 10.) Sopimuksessa asetetut vaatimukset voivat olla tarkasti määritettyjä osa-alueittain. Vaatimukset voivat myös olla suuntaa antavia, jolloin luokituslaitoksella on velvollisuus asettaa omat tarkemmat vaatimukset.

2.3 Luokituslaitokset

Luokituslaitokset ovat yksityisiä laitoksia, jotka pyrkivät myös omalta osaltaan parantamaan merenkulun turvallisuutta sekä ympäristöystävällisyyttä.

Luokituslaitosten tehtävä merenkulun kentällä on vaatimusten täytyessä myöntää alukselle luokitustodistus. Todistus edellyttää, että alus täyttää merenkulun kansainvälisessä yleissopimuksessa vaaditut sekä luokituslaitosten omat säännöt ja vaatimukset.

Luokituslaitoksilla on yleissopimuksesta poikkeavia sääntöjä ja määräyksiä. Laitosten vaatimukset eivät kuitenkaan voi olla ristiriidassa yleissopimuksessa asetettuihin vaatimuksiin. Vaatimukset voivat siis olla tiukempia, mutta eivät löyhempiä.

Luokitustodistuksen saaminen edellyttää, että laitos on tarkastanut ja hyväksynyt aluksen suunnittelupiirustukset sekä hyväksynyt aluksen rakennuksen aikana tehdyt ratkaisut. Myös valmistunut alus tarkastetaan ennen sen virallista käyttöönottoa. Aluksen luokituksen tarpeeseen vaikuttaa sen koko sekä kuljetustehtävä. Luokitusten ulkopuolelle jäävät muun muassa puolustusvoimien alukset, yksityiskäytössä liikennöivät jahdit sekä pienemmät kalastusalukset. Luokitus on vaatimus aluksen vakuuttamiselle sekä rekisteröinnille. Luokitus edistää myös aluksen sekä varustamon imagoa ja kaupattavuutta. Satamaan saapuminen ja rantautuminen edellyttää myös voimassa olevaa luokitusta. (IACS 2023.)

Kuten edellisessä kappaleessa todettiin, luokituslaitosten tehtäväksi saattaa jäädä omien tarkempien sääntöjen ja vaatimusten laatiminen. Tarkempien vaatimusten luonne on yleensä tiettyyn pienempään kokonaisuuteen sidottu, kuten esimerkiksi palontorjunnan kaluston sijoitteluun.

2.4 Muut kansainväliset vaikuttavat tekijät

Merenkulun aiheuttamien päästöjen vähentämisen taustalla vaikuttaa vuoden 2015 Pariisin ilmastopöytäkirja. Yhdistyneet Kansakunnat kokoontuivat yhteiskokoukseen vuoden 2015 alussa. Kokouksen keskustelujen tuloksena ilmaston lämpenemisen estämiseksi päätettiin hakea yhteinen linja. Lopullinen Pariisin sopimus allekirjoitettiin Yhdistyneiden Kansakuntien jäsenmaiden välillä joulukuussa vuonna 2015. Sopimuksen mukaan jäsenmaiden tulee saavuttaa hiilineutraali teollisuus vuoteen 2050 mennessä. (Ympäristöministeriö 2022.)

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO julkaisi vuonna 2018 strategiakokoelman kasvihuonekaasujen sekä CO₂-päästöjen vähentämiseksi. Strategian ja sen asetusten tavoitteena on vähentää kaupallisen laivaliikenteen CO₂-päästöjä 40 % vuoteen 2030 mennessä ja 70 % vuoteen 2050 mennessä. Vertailuvuotena päästöjen vähentämiseen käytetään vuotta 2008. (International Maritime Organization n.da.)

Toimintaa ohjailevana ohjenuorana toimii MARPOL:in uusi liite, Annex VI. Työkaluina päästöjen vähentämiseksi toimivat EEDI, EEXI sekä CII. EEDI viittaa uusien alusten suunnitteluun vaikuttavaan energiatehokkuuden suunnittelu indeksiin. EEXI puolestaan viittaa vanhojen, jo olemassa olevien, alusten energiatehokkuuden muutoksen indeksiin. (Suomen varustamot n.d.)

Edellisistä työkaluista EEDI on tullut voimaan rahtialuksille vuoden 2013 alusta. Autolautoille ja matkustaja-autolautoille se tuli voimaan syyskuussa 2015. EEXI:n ja CII:n säädökset astuivat voimaan tammikuun alusta 2023. (International Maritime Organization n.db.)

Tulevaisuuden vaihtoehtoiset polttoaineet ovat tavanomaisiin polttoaineisiin verrattuna vähemmän päästöjä aiheuttavia, mutta samanaikaisesti huomattavasti vaarallisempia sekä käytettäessä enemmän epästabiileja. Käsiteltävät polttoaineet esiintyvät jossain vaiheessa käytön kaarta nesteinä sekä kaasuna. Käytön kaarella tarkoitetaan ajanjaksoa aineen tuotannon alusta aina sen loppukäyttäjään.

Polttoaineiden paloturvallisuuden takaamiseksi laitteistot sekä polttoaineiden siirrot ovat tarkkaan suunniteltuja ja valvottuja. Toisin kuin tavanomaiset polttoaineet, työssä käsiteltävät polttoaineet esiintyvät kaikki huoneenlämmössä kaasuina. Tämä aiheuttaa vaarallisemman sekä onnettomuudelle alttiimman dynaamisen tilanteen mahdollisen vuodon yhteydessä. Ilman kanssa sekoituessaan kaasuista muodostuu syttymisherkkiä seoksia, joiden syttymiseen vaaditaan vain pieni syttymislähde, kuten kipinä.

3 Polttoaineiden ominaisuudet

3.1 Polttoaineiden ominaisia piirteitä

3.1.1 Nesteytetty maakaasu

Liquefied natural gas eli lyhyemmin LNG on nesteytettyä maakaasua. Tavallisesti kaasu koostuu lähes kokonaan metaanista (CH₄). Suurin osa maailmalla käytössä olevasta kaasusta on maaperän esiintymistä johdettua fossiilista polttoainetta. Maakaasun nesteyttäminen vaatii kaasun lämpötilan pudottamisen -162 °C:seen normaalissa ilmanpaineessa, kuten Liitteen 2 taulukosta 1 voidaan todeta. Tiivistyessään nesteeksi LNG:n ominaistilavuus pienenee yhteen kuudessadasosaan (1:600), mikä parantaa sen maailman laajuista kaupattavuutta sekä varastointikykyä. Kaasuna maakaasua olisi hankalaa ja kallista kuljettaa, joten tehokkain vaihtoehto on tiivistää se nesteeksi. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotettua maakaasua kutsutaan BIO-LNG:si. Maakaasua käytetään laajasti eri petrokemian alueilla, muun muassa lelujen, pesuaineiden ja lääkkeiden valmistuksessa. (Gasum 2022.)

Palaessaan maakaasu on varsin puhdas polttoaine. Palaessaan se tuottaa huomattavasti pienemmän määrän hiilidioksidipäästöjä, kuin tavanomainen raskas polttoöljy. Rikkioksidipäästöjen suhteen maakaasun käyttö ei tuota näitä lainkaan. Myöskään pakokaasupesureille ei ole tarvetta käytettäessä pelkkää kaasua. (Gasum 2022.)

Maakaasun käytön haittapuolena on se, että käytössä syntyy metaanin ohivuotoa (Methane Slip), joka aiheutuu moottorin kyvyttömyydestä polttaa kaikkea metaania. Sadan vuoden mittapuulla metaanin ohivuoto on noin 28-36 kertaa tuhoisampaa ympäristölle, kuin vastaavat hiilidioksidipäästöt. Kaasun palamista voidaan tehostaa pakokaasujen takaisinkierrätyksellä (EGR) sekä korkeapaineisella syöttöjärjestelmällä. (Wärtsilä training material 2020.)

3.1.2 Nestekaasu

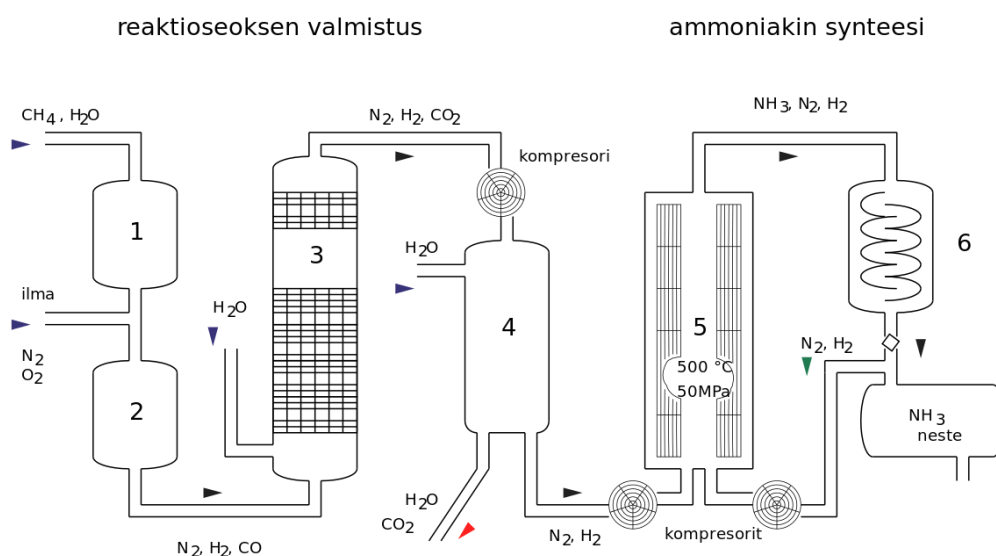
Tavanomainen nestekaasu (C_3H_8) on maakaasusta erotettua hiilivetykaasujen sekoitusta eli propaanin ja butaanin sekoitusta. Kaasua saadaan petrokemian sivutuotteena, fossiilisia polttoaineita jalostaessa. Kaasua esiintyy myös suoranaisesti maaperän esiintymissä. Nestekaasusta käytetään puhekielessä myös nimeä butaani tai propaani. Kaasua säilytetään paineistetussa säiliössä, jolloin osa siitä esiintyy säiliössä nestefaasina kaasufaasin lisäksi. Paine säiliössä on noin 8 baaria normaalissa huoneenlämmössä. Useat teollisuuden alat käyttävät nestekaasua energianlähteenä sen helppokäyttöisyyden sekä edullisen hinnan vuoksi. Kaasua käytetään monipuolisesti eri aloilla lämmitykseen, sulatukseen, hehkutukseen, päästämiseen sekä juottamiseen. (GRIT 2022.)

Nestekaasun etuina on pidetty sen puhtautta, energiatehokkuutta sekä alhaista hintaa. Nestekaasun energiatehokkuus piilee sen varastoinnissa ja jakelussa, sillä se ei vaadi jäähdytystä mataliin lämpötiloihin, toisin kuin muut työssä käsiteltävät polttoaineet. (GRIT 2022.)

3.1.3 Ammoniakki

Ammoniakki (NH_3) on myrkyllinen, pistävän hajuinen yhdiste, jota esiintyy kaikkialla luonnossa sekä ihmisissä. Aine esiintyy huoneenlämmössä kaasuna normaalissa ilmanpaineessa. Ammoniakki tuotetaan Haber-Bosch menetelmällä, jota on kuvattu kuviossa 2. Ammoniakkia voidaan säilyttää ja varastoida kahdella tavalla nestemäisenä. Aine voidaan paineistaa 10 baarin paineeseen normaalissa lämpötilassa (25 °C) tai vaihtoehtoisesti jäähdyttää kiehumispisteen alle -33 °C :seen. Ammoniakkia voidaan myös liuottaa veteen erilaisin seossuhtein kaupattavuuden ja turvallisuuden parantamiseksi. (Det Norske Veritas 2020.)

Ammoniakin palaessa se ei tuota lainkaan hiilidioksidipäästöjä. Etuna on pidetty myös sen energiatihyyttä sekä verrattaen matalaa säilytyslämpötilaa. Käytön haasteina ovat sen myrkyllisyys, hidas syttyminen, typenoksidipäästöt sekä korroosiota aiheuttava vaikutus. Päästöjen hallitsemiseksi edellytetään uusia moottoreiden ja pakokaasujärjestelmien tekniikoiden kehityksiä. Uusien moottorikonstruktioiden odotetaan saapuvan markkinoille vuonna 2024. Korroosion estämiseksi ammoniakkia voidaan seostaa veteen. (Global Maritime Forum 2022.)



Kuvio 2. Haber-Bosch menetelmä (Wikipedia 2023).

Haber-Boschin menetelmässä vedyn valmistus aloitetaan maakaasun höyryreformoinnilla. Seuraavaksi seokseen lisätään hallitusti happea ja typpeä. Kuvion 2 kolmannessa vaiheessa hiilidioksidi hapetetaan, jonka seurauksena kohdassa neljä haitta-aineet, kuten hiilidioksidi poistetaan seoksesta. Kohdassa viisi jäljelle jäänyt typpi-vetykaasun seos puristetaan paineeseen ja ohjataan ammoniakki-kontaktiuniiniin, jossa ammoniakkisynteesi tapahtuu. Viimeisessä vaiheessa ammoniakki joko nesteytetään lauhteessa tai seostetaan veteen. (Vojvodic ym. 2014.)

Ammoniakin tuotantoon kehitetään kestäväen kehityksen ratkaisuja, jolloin saadaan tuotettua niin sanottua vihreää ammoniakkia. Sinisen eli tavanomaisen ammoniakin tuotanto Haber-Boschin menetelmällä vaatii hiilivetyjen käyttöä, eikä näin ollen tue kestäväen kehitystä. Uusiutuvien aurinko- ja tuulivoimaloiden avulla tuotetun ammoniakin hiilijalanjälki jää pieneksi ja on näin ollen kestäväen kehityksen vaihtoehto. Kuten vedyn uusiutuvassa tuotannossa, vihreän ammoniakin tuotanto vaatii suuren energiamäärän. (Global Maritime Forum 2022.)

3.1.4 Vety

Työssä tutkittavista polttoainesta vety (H_2) on ainoa, joka ilmenee ympäristössä puhtaana alkuaineena. Vety esiintyy normaalissa lämpötilassa ja paineessa kaasuna. Vedyn nesteyttäminen vaatii sen jäähdyttämisen alle -253 °C :seen normaalipaineessa. Vetyä käytetään useilla eri teollisuuden- sekä kemianteollisuuden aloilla. Eniten vetyä käytetään ammoniakkin valmistuksessa sekä avaruusteollisuuden polttoaineena. (ABS 2021.)

Vetyä voidaan valmistaa erilaisin menetelmin ja prosessein. Yleisin tapa valmistaa vetyä on maakaasun höyryreformointi, jossa vedyn ja hiilen väliset kemialliset sidokset hajotetaan. Tuloksena syntyy puhdasta vetyä sekä hiilidioksidia. Kyseinen valmistustapa ei tue kestävää kehitystä hiilidioksidipäästöjen vuoksi. Puhtain prosessimuoto tuottaa vetyä tapahtuu elektrolyysillä, jossa sähköön avulla vedestä (H_2O) erotetaan vihreää ja hiilineutraalia vetyä. Elektrolyysiprosessi vaatii suuren määrän sähköenergiaa, mikä tekee siitä verrattaen kallista ja tällä hetkellä kannattamatonta. Kestävän kehityksen näkökulmasta elektrolyysiin tarvittavaa sähköä voitaisiin tuottaa uusiutuvilla energianlähteillä, kuten tuuli- ja aurinkovoimalla. (ABS 2021.)

Vedyn sisältämä energia sen massayksikköä kohden (120 MJ/kg) raskaaseen polttoöljyyn verrattuna on lähes kolminkertainen. Vedyn kokonaisvaltainen energiatiheys sen sijaan on verrattaen huono sen todella pienen tiheyden vuoksi. (Motiva 2020.) Vedyn tiheyttä ja energiatiheyttä on esitetty Liitteen 2 taulukossa 2. Vedyn energiatiheyden ja kannattavuuden maksimoimiseksi sen säilytys tapahtuu joko nesteytettynä tai usean sadan baarin paineessa kaasuna. Paineastia on tyypillisesti teräksinen säiliö, jota ympäröi hiilikuitukomposiitista valmistettu ulompi kerros. Säilytys nesteinä vaatii valtavat lämpötilan muutokset, jotka alentavat vedyn energiatehokkuutta. (AirLiquide hydrogen 2023.)

3.2 Polttoaineiden siirto maista laivaan

3.2.1 Nesteytetty maakaasu

Maakaasun tankkaus laivaan voidaan toteuttaa joko merellä tai satamassa. Tavanomaisesti LNG:tä tankataan laivaan satamassa rahdin purun yhteydessä. Polttoaineen siirto voidaan suorittaa maista käsin joko erillisestä säiliöstä tai säiliörekasta. Tankkaus voidaan myös suorittaa feeder aluksesta käsin. Tankkien täyttöä varten aluksen tulee olla kiinnittyneenä köysin joko laituriin tai feederiin turvallisen siirron takaamiseksi. Maakaasua kuljettavat tankkerit voivat myös käyttää rahdista höyrystyvää kaasua (BOG) omaan propulsioonsa.



Kuva 1. M/S Viking Gracen LNG:n tankkaus AGA:n seagas aluksesta (Viking Line 2021).

Tankkaus suoritetaan aluksen tankkausaseman kautta laitaluukusta. Laivassa oleva maakaasun tankkausasema on erotettuna tavanomaisten polttoaineiden tankkausasemasta. Asemalla tapahtuvaa tankkausta valvotaan valvontakameroiden avulla joko komentosillalta, konevalvomosta tai erillisestä valvontatilasta.

Laivan sisäiset putket tankkausasemalta tankkiin ovat tyypillisesti joko ruostumatonta terästä (AISI 304) tai haponkestävää terästä (AISI316). (Wärtsilä training material 2020.)

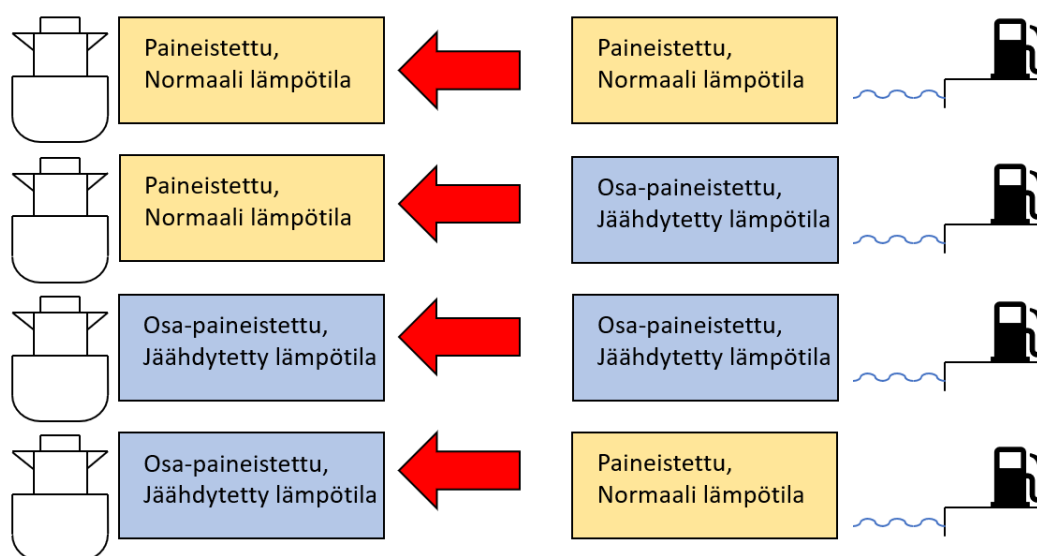
Tankkausasemalle tulee mitoittaa kiinteät ilmaisimet havaitsemaan mahdolliset tulipalopalot ja kaasu- sekä nestevuodot. Tiloihin tulee myös mitoittaa kiinteät vesisammutusjärjestelmät kattoon sekä tankkauslaitteistojen ylle. Vesisammutuksen lisäksi voidaan asentaa myös kiinteä jauhesammutusjärjestelmä. Vuodon sattuessa tulee mittareiden ilmoittaa vuodosta tankkausta valvovalle henkilölle valvontamonitorille. Vuodon sattuessa tulee tankkaus pystyä pysäyttämään viidessä sekunnissa joko automaation toiminnalla tai manuaalisesti. Tankkausasemille tulee myös mitoittaa vesiverhot, joiden avulla vuotavan nesteen kylmyyden vaikutus laivan rakenteisiin voidaan minimoida. Tankkauslinjan alle tulee myös mitoittaa vuotokaukalo, johon vuotanut neste kerääntyy. Kulku tankkausasemille tulee toteuttaa ilmalukon kautta. Tiloilta tulee myös mitoittaa oma, muusta laivasta erotettu, ilmanvaihto. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.5 2022.)

3.2.2 Nestekaasu

Alukset, jotka käyttävät nestekaasua omaan propulsioonsa, ovat tyypillisesti samaa kaasua kuljettavia säiliöaluksia. Samalla kun alus täyttää lastille varatut säiliöt, täyttää se omalle propulsiolle varatut tankit. Tämä mahdollistaa helpon ja vaivattoman polttoaineen täydennyksen. Alus voi myös käyttää varoventtiilien kautta vapautuvaa ohivuotoa (BOG) omaan propulsioonsa. Nestekaasua voidaan syöttää alukseen toisesta aluksesta, tankkausterminalista sekä säiliörekasta. Alus voidaan tällöin tankata joko merellä tai satamassa riippuen sataman tarjonnasta. Tankkaus voidaan myös suorittaa neljällä tavalla, riippuen vastaanottavan laivan sekä tankkaajan säilytysjärjestelmästä. (Det Norske Veritas 2017.)

Säilytysvaihtoehdot ovat pelkästään paineistettu järjestelmä tai osapaineistettu ja samalla jäädytetty järjestelmä. Paineistetussa järjestelmässä nestekaasu on paineistettu normaali lämpötilassa noin 17 baarin paineeseen, jolloin se säilyy nestemäisenä. Osapaineistuksessa ja jäädytyksessä nestekaasun lämpötilaa laskiessa sen nestemäisyys voidaan säilyttää matalammalla paineella. Tällöin nestekaasun lämpötila lasketaan -10 °C :seen sekä paineistetaan noin 4-8 baarin paineeseen. Eri vaihtoehdot polttoaineen siirrolle on esitetty kuviossa 3.

Nestekaasun turvallisuusmitoitus on hieman nesteytettyä maakaasua löyhempi, joskin suurin osa säännöistä on samoin kirjoitettuja. Nestekaasua propulsioon käytettäville aluksille tankkausasemien vaatimukset ovat lähes identtiset maakaasuun nähden. Asemat tulee mitoittaa mittareilla ja antureilla mahdollisten vuotojen sekä palojen havaitsemiseksi. Asemat tulee varustella kiinteällä vesisammutusjärjestelmällä sekä mahdollisesti jauhesammutusjärjestelmällä. Vuodon ilmaantuessa tulee järjestelmän tankkaus pystyä keskeyttämään manuaalisesti sekä automaattisesti etäohjatulla venttiilillä. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.5 2022.)



Kuvio 3. Nestekaasun tankkausvaihtoehdot maista laivaan (Rautalin 2022).

3.2.3 Ammoniakki

Kansainvälinen IGF-koodi lausuu, että ammoniakkijärjestelmä sekä -laitteistot tulee suunnitella noudattaen muiden vertailukelpoisten polttoaineiden (LNG) suunnitteluperiaatteita. Järjestelmän turvallisuus tulee saattaa vähintään samalle tasolle kuin vertailtavalla polttoaineella. (IGF-koodi 2023.)

Ammoniakin siirtäminen laivaan nojautuu lähes samoihin sääntöihin kuin mitä maakaasulle on asetettu. Aluksen tankkauslaitteistoon liitettävän syöttöletkun alle tulee mitoittaa vuotokaukalo, joka estää mahdollisen vuodon leviämistä. Tankkausasemat tulee mitoittaa kiinteällä vesisammutusjärjestelmällä, kuten etäohjattavilla avoimilla suuttimilla. Suuttimilla voidaan myös sitoa vuodon yhteydessä vapautuvaa kaasua veteen. Samalla pitoisuudet kyetään laimentamaan lähemmäs turvallista rajaa. Vesisammutuksen lisäksi voidaan asentaa myös kiinteä jauhesammutusjärjestelmä. Asemiin tulee tavallisten palonilmaisimien lisäksi asentaa myös mittarit ammoniakin sekä nestemäisen että kaasumaisen vuodon varalle. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)

Tankkausasemia käsitellään ensimmäisen tason vaara-alueina, jolloin ne tulee mitoittaa täysin kaasutiiviiksi. Asemien sisäänkäynnit tulee myös varustaa ilmalukolla. Ilmalukko voidaan toteuttaa kahden kaasutiiviin oven ja niiden väliin jäävän huoneen turvin. Asemille tulee myös mitoittaa riittävä tuuletus sekä niin sanottu ylimitoitettu katastrofituuletusmahdollisuus. Välittömään läheisyyteen tulee myös mitoittaa hätäsuihku sekä huuhtelupaikka silmien huuhtelua varten. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)

3.2.4 Vety

Vedyn tankkaukseen vaikuttaa se, missä olomuodossa sitä aluksella varastoidaan. Markkinoiden ensimmäiset pienet alukset käyttävät polttoaineenaan nesteytettyä vetyä (LH2). Polttoaine voidaan siirtää alukseen tavanomaista putkilinjaa pitkin nesteytettynä. Meriteollisuuden kentällä on uutena vaihtoehtona esitetty ratkaisua, jossa vetysäiliöt poistetaan laivasta täyttöä varten. Näissä täysvaihto-optioissa vety voidaan varastoida säiliöön joko nestemäisenä tai kaasumaisena. Vedyn säilytyspaine kaasumaisena säiliössä on yleensä välillä 350 baaria ja 700 baaria. Näin korkea säilytyspaine ei tue turvallista polttoaineensirtoa maista laivaan putkilinjan kautta.



Kuva 2. Yksi maailman ensimmäisistä, pelkästään vedyllä operoiva alus (NORLED 2022).

Vaihdettavien säiliöiden toiminta perustuu niiden täysmittaiseen vaihtoon aluksen laitaluukun kautta. Tankki poistetaan laivasta kiskoja pitkin ja lasketaan vajereiden varassa maihin. Satamasta rekka-auto kuljettaa tankit uudelleen täytettäviksi teolliseen laitokseen. Menetelmä mahdollistaa myös tankin täytön turvallisissa olosuhteissa tuotantolaitoksessa. Laivassa tankkiin kiinnitetään putkilinjat, jotka johdetaan polttoaineen syöttökoneistolle. (ABB 2022.)

Suoranaisia sääntöjä vedyn käytölle ei vielä ole, vaikkakin DNV:n RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.3 käsitteleeekin polttokennoja ja niiden polttoaineita. Polttoaineeksi mainitaan muutaman kerran vety. Tarkastelua suoritettiin edellä mainitun pohjalta.

Tilat, joissa vetyä ja polttokennoja operoidaan, tulee kaikki saattaa ensimmäisen tason vaara-alueiksi. Tilat tulee mitoittaa hyvällä ilmanvaihdolla sekä tilan rakenteet suunnitella siten, että kaasut ohjautuvat itse ilmanvaihtokanavien ottoaukoille. Ilmanvaihtokanavat tulee olla mitoitettu etäohjattavin palopellein. Tiloihin tulee myös mitoittaa kiinteät mittalaitteet sekä anturit mahdollisten kaasuvuotojen sekä palojen havaitsemiseksi. Tiloihin tulee mitoittaa ainakin yksi kiinteä sammutusjärjestelmä, jonka hyväksyttäminen toteutetaan erikseen. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.3 2022.)

3.3 Polttoaineiden varastointi

Polttoaineiden säilytystä ohjaa kansainvälinen IGF-koodi, jonka mukaan aluksen koneistot sekä tilat tulee mitoittaa. Paikallisen viranomaisen sekä aluksen luokituslaitoksen asettamat säädökset tulee myös huomioida. Laivan oman propulsioon käyttöön tarkoitetun polttoaineen tankkien turvallisuusmitoitus eroaa rahtina kuljetettavan aineen vaatimuksista. Tämä johtuu suoranaisesti aineiden pienemmistä määristä.

3.3.1 Nesteytetty maakaasu

LNG:n varastointi laivassa voidaan toteuttaa neljällä erilaisella tavalla riippuen tankin rakenteesta sekä käyttötarkoituksesta. Vaihtoehdot ovat A-, B-, sekä C-tyypin tankit. Varastointi voidaan myös toteuttaa muista eroavan integroidun väliainetankin (Membrane tank) avulla. Alukselle sopivan tankin valintaan vaikuttaa haluttu sijoituspaikka alukseen sekä aineen kokonaismäärä. Vaihtoehdoista A- ja B-tyypin tankeissa sekä integroidussa väliainetankissa nesteytetty maakaasu säilytetään normaalipaineessa.

C-tyypin tankki on vaihtoehdoista ainoa, jossa nesteytettyä maakaasua säilytetään paineen alaisena. Nämä C-tyypin tankit on suunniteltu kestävämmän tyypillisesti noin 5 -10 baarin paineen. C-tyypin tankit on suunniteltava noudattamaan kansainvälisiä paineastioiden vaatimuksia sekä kestävämmän konservatiivisia voimia. Tyypillisimmin aluksen omaan propulsioon tarkoitettu LNG säilytetään C-tyypin tankissa. (ABS 2022.)

Nesteytetyn maakaasun tankkien säilytys laivassa vaihtelee alustyypeittäin sekä aluksen tilantarpeen mukaan. Rahtialuksissa ruuman rahtitilat halutaan mahdollisimman suuriksi, kun taas risteilijöissä kannet halutaan hyödyntää matkustajien käyttöön sekä viihtyvyyteen. Rahtilaivoissa tankit sijaitsevatkin tyypillisesti kannella. Risteilijöissä sekä joissain matkustaja-autolautoissa tankit sijaitsevat alemmilla kansilla konehuoneen tasossa.

Esimerkkinä vuonna 2022 valmistuneessa M/S Viking Gloryssa tankit sijaitsevat alemmilla kansilla suljetussa tilassa. M/S Viking Gracea rakennettaessa vuonna 2012 LNG oli varsin tuore vaihtoehto matkustaja-autolautan polttoaineeksi, jolloin luokitus ei vielä hyväksynyt tankin sijoitusta aluksen sisätiloihin. (Det Norske Veritas 2022.)



Kuva 3. M/S Viking Grace LNG-säiliöt aluksen peräkannella (Wärtsilä 2018).

Palontorjunnan näkökulmasta nesteytetyn maakaasutankin sijoittelu laivan ulkokannelle helpottaa huomattavasti kyseisten järjestelmien vaatimuksien tasoa. Aluksen sisälle sijoitetut tankit tosin takaavat paremman tilankäytön esimerkiksi matkustaja-aluksissa. Sisätiloissa tankkien ympärille voidaan vaatia mitoittamaan suojaavampi toisioseinämä (secondary barrier). C-tyypin tankki on tankkivaihtoehtoista ainoa, joka ei vaadi tätä. Tankkien tiloihin tulee myös mitoittaa kiinteät mittalaitteet havaitsemaan kaasun vuodot sekä mahdolliset palot. Palon havaitsemiseen voidaan käyttää yhdistelmämittareita, jotka havaitsevat sekä savua, että liekkiä. Sisätiloissa tankkien ylle tulee mitoittaa kiinteä vesisammutusjärjestelmä. Järjestelmän tuottoasteen tulee olla vähintään 10 L / min / m² horisontaalisille pinnoille. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.5 2022.)

3.3.2 Nestekaasu

Nestekaasua voidaan varastoida laivassa lähes samalla menetelmällä, kuin nesteytettyä maakaasua. Nestekaasun säilytyslämpötilan vaatimusten ollessa pienemmät kuin LNG:llä, ei sen nesteenä pitämiseen vaadita yhtä suurta energiamäärää. Useimmissa laivoissa nestekaasua säilytetään paineistettuna 17 baarin paineessa normaalissa lämpötilassa. Toinen vaihtoehto säilytykselle on sen osapaineistaminen, jolloin lämpötilaa joudutaan alentamaan muutamia asteita. Osapaineistuksessa tyypillisesti paineistus on noin 4-8 baaria sekä lämpötila noin -10 °C. Pelkästään paineistettu vaihtoehto on tosin huomattavasti edullisempi sekä yksinkertaisempi vaihtoehto osapaineistamiselle ja jäähdyttämiseksi. Jäähdyttäminen vaatii myös varajärjestelmiä mahdollisen häiriön varalle. Tyypillisesti jäähdyttämiseen voidaan käyttää muita kaasuja kuten typpeä. (Det Norske Veritas 2017.)

Aluksen tankkien erilaisten vaihtoehtojen johdosta tankeilla on erilaiset vaatimukset. Jäähdytetyt tankit tulee suunnitella ja mitoittaa materiaaleista, joiden käyttäytymiseen ei lämpötilalla ja sen vaihtelulla ole vaikutusta. Vaihtoehtoisesti paineistetulle tankille tulee paineen vaihteluiden mukaan mitoittaa oikeat materiaalit sekä turvamarginaalit.

Tankkauksen yhteydessä nestekaasun säilytysvaihtoehdot voivat olla eriävät antavan sataman ja vastaanottavan aluksen välillä. Tällöin osapuolten tulee omata laitteistot ja järjestelmät polttoaineen turvalliselle olomuodon muutokselle. (Det Norske Veritas 2017.)

Kuten nesteytetylle maakaasulle, tulee nestekaasulle mitoittaa toisioseinämä, mikäli sitä varastoidaan muussa kuin C-typin tankissa. Nestekaasulle kiinteä vesisammutusjärjestelmä on myös ehdoton. Järjestelmän tuottoasteen tulee myös saavuttaa 10 L/ min / m² horisontaalisille pinnoille. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.13 2022.)

3.3.3 Ammoniakki

Ammoniakille tankin vaatimus ei ole yhtä vaativa teknisesti, kuin nesteytetylle maakaasulle. Tämä johtuu ammoniakkin matalammasta säilytyspaineesta sekä lämpötilasta. Aineena ammoniakki on muita kaasuja selvästi vaarallisempi ihmiselle sen vapautuessa ilmaan. Vaarallisuuden johdosta tankin turvallisuus ja materiaalit tulee tarkoin mitoittaa. (Pelastusopisto 2022.)

Ammoniakkia sisältäville alueille tulee mitoittaa ensimmäisen tason vaara-alue. Tietyt alueet, joilla ammoniakkia käsitellään, tulee mitoittaa täysin kaasutiiviiksi, jolloin voidaan varmistua, ettei kaasua pääse tunkeutumaan vaarattomaksi merkityille alueille. Siirryttäessä vaara-alueilta ei vaaralliselle alueelle, tulee alueiden väliin mitoittaa ilmalukko. Ilmalukko toteutetaan alueiden väliin jäävällä huoneella tai tilalla. Vaara-alueiden poistumisreittien läheisyyteen tulee myös mitoittaa hätäsuihku mahdollisten roiskeiden huuhtelua varten sekä välineet silmien huuhteluun. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)

Kuten nesteytetylle maakaasulle ja nestekaasulle tulee ammoniakille mitoittaa toisioseinä, mikäli sitä varastoidaan muussa kuin C-tyyppin tankissa. Ammoniakille kiinteä vesisammutusjärjestelmä on myös ehdoton. Järjestelmän tuottoasteen tulee myös saavuttaa 10 L/ min / m² horisontaalisille pinnoille. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)



Kuva 4. Ammoniakkisäiliö sekä säiliön liitännäkoneikko (Wärtsilä 2020).

Tankkien sijoittelussa tulee ottaa huomioon törmäyksen sekä pohjakosketuksen mahdollisuus sekä näiden vaikutukset laivan rakenteisiin. Tankit tulee sijoittaa riittävän korkealle aluksen pohjasta, sekä riittävän kauas törmäyslaipiosta. Tankit tulee myös suojata muulta mekaaniselta vahingolta. Mahdollisten vuotojen ilmaantuessa tulee rungon rakenteiden kestää lämpötilan muutokset. Tankkeja tulee ympäröidä tyhjä tila, jossa ei ole muita A-tason koneistoja tai laitteita. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)

Vaarallisten kaasujen leviämisen estämiseksi kaikissa tiloissa, joissa on riski ammoniakin vuodoille, tulee olla erillinen tuuletusjärjestelmä. Tiloissa hallitsevan ilmanpaineen tulee olla matalampi, kuin sitä ympäröivissä tiloissa, kaasujen leviämisen estämiseksi. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.14 2022.)

3.3.4 Vety

Vedyn säilytys aluksessa voidaan toteuttaa joko nesteytettynä tai kaasumaisena. Nesteyttäminen vaatii aineen lämpötilan pudottamisen -253°C :seen. Vaihtoehtoisesti sitä voidaan myös varastoida 350 baarin tai 700 baarin paineessa, jolloin sen olomuoto voidaan säilyttää kaasuna. Pienissä käyttömäärissä vetyä säilytetään paksuseinämäisessä teräksisessä paineastiassa kaasuna. Suuri paine tankissa vaatii ulomman hiilikuitukomposiittivaipan, joka suojaa tankkia sisäiseltä paineelta. Nestemäisenä varastoidessa tulee tankilla olla hyvät kyrogeeniset ominaisuudet lämpötalouden ylläpitämiseksi. (Demaco 2022)

Vetytankit ovat tyypillisesti muodoltaan pallomaisia, toisin kuin muiden kyrogeenisten aineiden säilytystankit, jotka ovat sylinterin muotoisia. Pallomaisen muodon ansiosta pystytään minimoimaan aineen ja sitä ympäröivien olosuhteiden vuorovaikutus ja tarkemmin lämpöterminen vuorovaikutus. Pieni lämmön vuorovaikutus aineen kanssa takaa pienemmän höyrystymisen sekä aineen paremman säilyvyyden tankissa. (Demaco 2022)

Energiatehokkain tapa säilöä vetyä nestemäisenä voidaan toteuttaa säiliön tyhjiöerityksellä. Menetelmä on osoittautunut lähes täydelliseksi pitämään nesteet niiden ominaisessa lämpötilassa. Tyhjiöeristys koostuu nimensä mukaisesti kahden eristävän kerroksen eli vaipan ja tankin väliin jäävän tilan korkeasta negatiivisesta paineesta. Kaksoisvaippa tuo myös turvaa mahdollisen sisemmän vaipan vaurioituessa ja alkaessa vuotaa. (Demaco 2022)

Kuten edellä mainittu, pallomainen tankki on säilyvyyden kannalta paras. Laivan propulsioon käyttöön tarkoitetut tankit ovat tosin tyypillisesti sylinterin mallisia parhaan tilankäytön takaamiseksi. Kuvasta 5 voidaan tulkita edellä mainittu sylinterin mallinen tankki sekä sen liitännäkoneikko.



Kuva 5. Vetysäiliö sekä säiliön liitäntäkoneikko (Man ES 2022).

Luokituslaitos Det Norske Veritaksen mukaan kaikkia vedylle ja tämän polttokennoille alttiita alueita tulee käsitellä ensimmäisen tason vaaravyöhykkeenä. Tiloihin tulee mitoittaa kiinteät mittarit palolle sekä kaasumaisille vuotoille. Vetyä käytettäessä tulee kuitenkin huolehtia riittävän hyvistä paloa havaitsevista antureista näkymättömän palamisliekin ja lähes savuttoman palamisen vuoksi. Tiloihin tulee myös mitoittaa kiinteä sammutusjärjestelmä. Sammutusjärjestelmän tarkempi konstruktio voidaan määrittää yhdessä laitetoimittajan sekä lippuviranomaisen kesken. Tilan ilmanvaihtokanavien tulipellit tulee olla sulkeutuneena ennen laukaistavan sammutusjärjestelmän laukaisua. (DNV-RU-SHIP, Pt.6 Ch.2 Sc.3 2022.)

4 Aktiivinen ja passiivinen palontorjunta

Merenkulussa palontorjunta voidaan jakaa eri toimintatapojen ja ympäristöjen mukaan. Tässä työssä jakona käytettiin aktiivisia ja passiivisia palontorjunnan menetelmiä. Aktiivisilla tarkoitetaan kiinteitä itsenäisesti tai automaattisesti toimivia laitteita sekä järjestelmiä. Passiivisilla tarkoitetaan ihmisen toiminnalla käynnistettäviä suojaavia toimenpiteitä.

4.1 Aktiivinen palontorjunta

Aktiivinen torjunta voidaan jakaa vielä palon havaitseviin sekä paloa sammuttaviin järjestelmiin. Kappaleessa käsitellään myös kaasumaisille polttoaineille välttämättömiä mittareita ja antureita.

4.1.1 Palosta ja vuodoista ilmoittavat automaattiset anturit ja hälyttimet

Käytettävän anturin tai hälyttimen tyyppi ja ominaisuudet määräytyvät sille osoitetun tilan käyttötarpeen mukaan. Käyttötarpeen mukaan tilalle muodostuu myös tilakategoria, joka pohjautuu tulipalon mahdollisuudelle syttyä kyseisessä tilassa. Kategoriointiin vaikuttaa myös aluksen yleinen kuljetustehtävä sekä sen matkustajien lukumäärä. (SOLAS, Ch II-2, Part C, Reg 9 2022.)

Hälyttimet voivat olla yksilöityjä tietyille muuttujille, kuten savulle, liekille tai lämmölle. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertainen hälytin, joka havaitsee pelkästään savua. Hälyttimet voivat myös olla yhdistelmähälyttimiä, joissa yhdistyvät esimerkiksi lämpö- sekä savuilmaisin. Tiloissa, joissa laivan henkilökunta ja matkustajat viettävät aikaa, tulee jokainen hälytin olla varustettu akustisella varoitussummerilla. Manuaalisia ilmaisinpainikkeita tulee myös olla sijoitettuna seinille näkyviin paikkoihin.



Kuva 6. Miehistöhytin savunilmaisim (Rautalin 2023).

Automaattisesti toimivien sprinklereiden aktivoituessa tulee niiden antaa visuaalinen sekä akustinen hälytysignaali. Tiedon tulee myös välittyä aluksen komentosillalle tai jatkuvasti miehitetylle valvontakeskukselle. (FSS Code, Ch 2, part 2 2022.)

Aluksilla, joissa matkustaa yli 36 henkilöä, tulee myös suorittaa henkilökunnan toimesta palovahtikiertoja. Kierroksien yhteydessä vahti kuittaa käyneensä tarkistamassa kyseisen tilan sähköisellä kulkutunnisteella tai avaimella. Kierrokseen kuuluvat alueet on määritetty riskianalyysin pohjalta. (Maritime safety committee 2022.)

Työssä käsiteltävien polttoaineiden käytössä on oleellista ottaa huomioon myös tilojen ilman pitoisuuksien mittaus ja analysointi, mahdollisen vuodon havaitsemiseksi. Käsiteltävien kaasujen ollessa huomattavasti ilmaa kevyempiä tulee niiden leviämisen riski muihin tiloihin ottaa huomioon. Kaasuista nestekaasu on ainoa, joka on ilmaa raskaampaa. Tavanomaisten polttoaineiden ollessa nestemäisiä normaalipaineessa ja -lämpötilassa, ei tätä ongelmaa ilmene. Kaasun leviäminen muihin ympäröiviin tiloihin tulee olla estetty tilojen tiiveyden sekä tuuletuksen avulla.

Ilman kaasupitoisuuksien mittaukseen voidaan käyttää yhdistelmämittareita, jotka analysoivat ilman seossuhteita. Kuvassa 7. on esitetty erään laitevalmistajan kiinteäksi asennettava mittalaite. Mittalaitteet tulisi sijoittaa etäälle korkeapainejärjestelmistä, jotta kaasupilvi ehtii muodostua, ja anturi havaita tämän. Mittalaitteita tulee myös sijoittaa ottamaan näytteitä järjestelmien tuplaputkien väliin jäävästä tilasta. Mittareihin voidaan asettaa halutut raja-arvot, joihin se reagoi. Tyypilliset raja-arvot ovat 20 % ja 40 % alemmasta syttymisrajasta. Mittarit ovat monitoroituja konevalvomoon sekä komentosillalle. Esimerkkinä LNG-järjestelmissä mittarit on sijoitettu kaasuventtiiliyksikön (GVU) tuuletuksen poistoaukoille. (Consilium 2023.)



Kuva 7. Kiinteäksi asennettava kaasumittari (Consilium 2023).

4.1.2 Paloa torjuvat automaattiset järjestelmät

Aktiivisiin palontorjuntalaitteisiin ja järjestelmiin on markkinoilla tarjolla useita erilaisia vaihtoehtoja. Merenkulussa palontorjunta hoidetaan tyypillisesti merivedellä sen hyvän saatavuuden vuoksi. Varajärjestelmänä voidaan käyttää aluksen omia vesivaroja, kuten teknistä vettä. Esipaineistetussa sprinklerijärjestelmässä oleva vesi on tyypillisesti aluksen teknistä vettä, joka aiheuttaa vähemmän korroosiota suolaiseen meriveteen nähden. Aktiivisia järjestelmiä ovat esimerkiksi:

- korkeapainevesisumujärjestelmä
- matalapainevesisumujärjestelmä
- sprinklerisammutusjärjestelmä
- CO₂-sammutusjärjestelmä
- vaahtosammutusjärjestelmä
- jauhesammutusjärjestelmä

Yllä mainituista järjestelmistä korkeapaine- ja matalapainevesisumu sekä sprinklerit perustuvat kaikki veden sammuttavaan vaikutukseen. Konetiloissa tyypillisemmin käytetyn CO₂-järjestelmän toiminta perustuu palamiseen tarvittavan hapen syrjäyttämiseen. Vaahtoa hyödyntävällä järjestelmällä saavutetaan lähes samanlainen vaikutus tulipaloon kuin CO₂:lla, mutta myös sen lisäksi päälle muodostuu happea eristävä kalvo. Järjestelmistä ainoa välitöntä vaaraa ihmiselle aiheuttava on CO₂, joka syrjäyttää tilasta hapen.

Tilassa, jossa on CO₂ sammutusjärjestelmä, tulee olla akustiset sekä visuaaliset varoitimet, kuten kuvassa 8 on esitetty. Pullohuoneessa sijaitsevassa venttiiliyksikössä on laukaisua hidastava kellomekaniikka. Laukaisusta on tapauskohtaisesti aikaa noin 30 sekuntia poistua tilasta, ennen kaasun vapautumista.



Kuva 8. CO₂-järjestelmän laukaisun visuaalinen sekä akustinen varoitin (Rautalin 2023).

Vuosien saatossa kiinteitä kaasumaisia tulipalon sammutukseen tarkoitettuja järjestelmiä on poistettu tai konvertoitu toimivaksi hiilidioksidilla. Muita vaihtoehtoisia sammuttavia kaasuja ovat olleet muun muassa: Halon eri muodoissa sekä muut fluorihilivetyjä sisältävät kaasut. (Solus, Ch. II-2, Part C, Reg. 10, 2022.)

Vesisumujärjestelmiä käytetään tyypillisesti myös aluksen koneistotiloissa. Suuttimet ovat avoimia, kuten kuvasta 9 voidaan tulkita sekä putkilinjat kuivia, kunnes ne laukaistaan. Järjestelmä on tyypillisesti solenoideilla ohjattu, jolloin solenoidille ohjattu sähkö saa venttiilin aukeamaan. Linjastojen laukaisu on eriytetty erilliseen venttiilikeskukseen (Valve Center) koneistotilojen ulkopuolelle. Järjestelmän laukaisu toteutetaan manuaalisesti käsin laukaisutaulusta. Taulut ovat tyypillisesti sijoitettu koneistotilojen läheisyyteen sekä komentosillalle. Järjestelmän yksilöidyt linjastot on yleensä jaoteltu suojaamaan yksittäisiä koneiston laiteyksiköitä, kuten kuvasta 10. voidaan tulkita.



Kuva 9. Vesisumusuutin (water mist nozzle) (Rautalin 2023).



Kuva 10. Vesisumun linjasto laivan apukoneen yllä (Rautalin 2023).

Automaattisesti toimivista järjestelmistä sprinklerijärjestelmä on erilainen muihin järjestelmiin nähden. Sprinklerilaitteisto vaatii lauetakseen riittävän korkean lämpötilan, jotta lasipatruuna halkeaa ja vettä alkaa virrata. Kuvassa 11. on esitetty sprinklersuutin, jossa on punainen 68 °C lasipatruuna. Linjastot on ennalta paineistettu ja varustettu paineanturein. Linjaston paineen aleneminen aiheuttaa hälytyksen, jonka nojalla palopumppu käynnistyy ja paine alkaa nousta. Sprinklereitä voidaan käytännössä käyttää kaikissa laivan tiloissa, vaikkakin tyypillisesti niitä käytetään matkustaja-aluksissa. Ulkokansien tai parvekkeiden palontorjuntaan ei tosin voida kyseistä järjestelmää käyttää veden jäätymisvaaran vuoksi. Myöskään laivan tärkeiden sähköisten järjestelmien tiloissa ei voida automaattista, vettä hyödyntävää, järjestelmää käyttää. Näissä tiloissa vaihtoehtoisena ratkaisuna voidaan käyttää manuaalisesti laukaistavaa järjestelmää.

Sprinklereiden sijoittelussa tulee ottaa huomioon niiden kattavuus sekä niille asetetut vaatimukset. Sijoittelulla tulee saavuttaa 5 L / m² / min sammutusveden kattavuus nimellisalueella. (FSS Code, Ch 8, part 2, 2.5.2.3, 2022.)



Kuva 11. Sprinklersuutin laivan hyttitilassa (Rautalin 2022).

4.2 Passiivinen palontorjunta

Suunnittelun lähtökohtana on, että aluksen pelastuspalvelun tuottaa sen oma koulutettu henkilökunta. Onnettomuuksien koon sekä luonteen mukaan hätätilanteessa turvaudutaan myös tarvittaessa muihin viranomaisiin. Muiden viranomaisten toimialoja ovat rajavartiolaitokset, meripelastuskeskukset, pelastustoimen MIRG-ryhmät, poliisi sekä muut merialueilla liikkuvat alukset. MIRG-ryhmillä tarkoitetaan pelastuslaitoksen erikoiskoulutettuja pelastajia, jotka kykenevät toimimaan merialueilla ja saaristossa yhdessä rajavartiolaitoksen kanssa. Onnettomuuden sattuessa pelastus- ja sammutustoimintaa johtaa aluksen konepäällikkö, kunnes muu toimivaltainen viranomainen on ottanut tilanteesta johtovastuun. (Sjölund, M. haastattelu 19.1.2023)

Laivan koulutetun henkilökunnan määrä riippuu aluksen tyypistä ja kuljetettavasta lastista. Koulutetun henkilöstön tulee pystyä paikallistamaan ja mahdollisuuksien mukaan rajaamaan tai sammuttamaan tulipalo. Laivan henkilökunnan tulee suorittaa viiden vuoden välein lippuviranomaisen STCW-koulutus (Seafarers' Training, Certification and Watchkeeping). (International codes, STCW Code, 2022.) Kansi- sekä konepäällystö suorittavat tyypillisesti peruskoulutuksen lisäksi päällystön vaativamman koulutuksen (Advanced Fire Fighting) (Sjölund, M. haastattelu 19.1.2023).

4.2.1 Kalusto

Kuten tavanomaisille polttoaineille, myös kaasumaisille polttoaineille mitoitetaan palontorjuntaa varten sopiva kalusto. Työssä käsiteltäville polttoaineille ei toistaiseksi ole erityisvaatimuksia käsisammutuskalustolle. Toistaiseksi kalustolliset raja-arvot mitoitetaan tapauskohtaisesti luokituslaitoksen kanssa.

Kansainvälisten sääntöjen mukaan alukseen mitoitetaan riittävä määrä kalustoa sekä kykyä itsenäiseen palontorjuntaan. Aluksella tulee olla tarpeellinen määrä palolta suojaavia varusteita, paloposteja (ks. kuva 12), käsisammuttimia, letkua sekä erilaisia armatuurivälineitä. (FSS Code, Ch 3, part 2, 2022.)



Kuva 12. Paloposti, jossa yhdistetty rantayhde sekä paloletkukaappi (Rautalin 2023).

Palopostien sijaintia ohjaavat kansainväliset säännöt, joiden mukaan palopostien sijoittelu tulee toteuttaa. Esimerkkinä pääpalo-osastojen välisten ovien molemmilla puolilla tulee olla paloposti. Tällöin pelastajat voivat edetä turvallisesti osastosta toiseen paineellisen letkun kanssa.

Aluksessa tulee olla selkeästi muista tiloista eristetyt tilat (Fire station, Fire Locker), joissa varusteita ja välineitä säilytetään. Tilojen määrä vaihtelee alustyypeittäin rahdin ja koneistojen määrän ja laadun mukaan. Suunnittelun perustana aluksen jokainen tila tulee pystyä kattamaan kahdella työsuihkulla, joista toinen on yhden letkun mittainen ja toinen kahden letkun mittainen. Letkujen pituuksiin lisätään myös seitsemän metrin mittainen vesisuihkun kantama. Letkut on sijoitettu paloletkukaappeihin, kuten kuvassa 13. Kaapit voivat myös nimensä mukaisesti olla suljettuja kevyiden luukkujen takana. Suljettuja kaappeja käytetään tyypillisesti matkustaja-aluksissa. (Solas, Ch. II-2, Part C, Reg. 10, 2022.)



Kuva 13. Laivan käytävällä sijaitseva paloposti (Rautalin 2023).

4.2.2 Varustus

Henkilökohtaisten suojainten kuten sammutushaalareiden ja paineilmahengityslaitteiden määrät nojautuvat myös kansainvälisiin sääntöihin. Kaikissa yleissopimuksen piiriin kuuluvissa aluksissa tulee olla vähintään kaksi varustekokonaisuutta, joihin kuuluu saappaat, paloasu, kypärä, kypärän alushuppu sekä sammutuskäsineet. Kokonaisuuksien tulee myös sisältää vastaavat paineilmahengityslaitteet, kuin kuvassa 14. on esitetty. Laitteille tulee jokaiselle olla oma vaihtopullo varalle. Tarpeen mukaan paineilmapullojen täyttöä varten aluksella tulee myös olla suurtehokompressori, jolla pulloja voidaan täyttää. (Solas, Ch. II-2, Part C, Reg. 10, 2022.)



Kuva 14. Paineilmahengityslaitte sisältäen pullon, maskin sekä selkällevyn (Dräger 2022).

Kaasumaisia polttoaineita käytettäessä, tulee alus olla varustettu myös kemikaalisukellukselle tarkoitetuilla kemikaalisuojapuvuilla. Puvut ovat kaasusekä roisketiiviitä ja näin ollen estävät mahdollisten roiskeiden ja kaasujen tunkeutumisen varusteiden läpi. Puvun päälle voidaan pukea kylmäsuojaviitta, joka suojaa kemikaalipukua erittäin kylmiltä nesteroiskeilta. Hengitystä suojaavat paineilmalaitteet ovat varustettu kahdella paineilmapullolla, pidemmän työskentelyajan takaamiseksi. Paineilmaa hyödynnetään myös pukujen ylipaineistukseen, jolla varmistetaan pukujen sisäinen positiivinen paine ulkoilmaan nähden. Nämä puvun niin sanotut tuuletusputkistot avustavat myös pelastajan viilentämisessä.



Kuva 15. Kemikaalisuojapuku (Viking-life 2023).

4.2.3 Toiminta onnettomuustilanteessa

Laivan henkilökunnan tulee onnettomuuden sattuessa osata soveltaa harjoiteltuja toimintatapoja sekä pyrkiä saattamaan tilanne stabiiliksi parhaiden mahdollisten kykyjensä mukaan. Henkilökunnan tulee olla laitteistojen maahantuojiin kouluttamia, jotta onnettomuustilanteessa kyetään toimimaan oikein ja estämään mahdollisten lisävahinkojen syntyminen.

Kaasumaisen polttoaineen vuodon sattuessa maalla, turvallisin vaihtoehto on antaa vuodon jatkua hallitusti. Aluksen sisällä rajatussa tilassa tämä toimintamalli on tosin hankala toteuttaa. Vuodon sattuessa tulee tunnistaa vuotokohdassa vaikuttava paine sekä rajapinnan materiaali ja laatu. Vuoto voidaan yrittää tukkia, mutta tällöin tulee ottaa huomioon vuotokohdan mahdollinen laajeneminen tai jopa repeäminen. (Tokeva 2021, 2023.)

Mahdollisen vuodon syntyessä tulee huomioida ympäristössä vaikuttavat tekijät. Mikäli vuodon yhteydessä purkautuva kaasu syttyy palamaan, on tärkeää toimia ohjeiden mukaan. Hallitsematon ja harkitsematon toiminta voi aiheuttaa säiliön tai linjaston repeämisen ja tätä seuraavan räjähdysmäisen leimahduksen. Palon yhteydessä on tärkeää pitää yllä tilannekuvaa. Pintojen lämpötilaa tulee tarkkailla lämpökameran avulla ja tarpeen mukaan jäähdyttää vesisuihkulla. (Tokeva 2021, 2023.)

Suoranaisia toimintamalleja ja taktiikoita on merillä kulkeville aluksille haastavaa etukäteen suunnitella. Kuten seuraavassa kappaleessa käsitellään, on meren tuoma elementti pelastustoimintaa hankaloittava ja vaikeuttava tekijä. Tilanteet, joissa pelastus- ja sammutustoimintaa tulee suorittaa, ovat lähtökohtaisesti aina poikkeuksellisia sekä uniikkeja. Aluksen henkilökunnan suorittamat viikoittaiset ja kuukausittaiset harjoitukset luovat hyvän pohjan pelastustoiminnan tuloksellisuudelle onnettomuuden sattuessa. Myös eri tasoista onnettomuustutkimuksista voidaan hyödyntää havaittuja puutteita ja ongelmatekijöitä. Onnettomuustutkimusten tarkoituksena onkin tutkia onnettomuuteen johtaneiden tapahtumien kulkua, eikä etsiä syyllistä.

5 Työn tulokset ja niiden arviointi

5.1 Polttoaineiden käytön analysointi

Yhtenä tulevaisuuden suurimpana haasteena tulee olemaan päästövapaan sekä riittävän energian varastointi kustannustehokkaaseen tilavuuteen.

Nykyisten vaihtoehtojen polttoaineiden ratkaisulla kyetään tehokkaasti operoimaan lyhyen matkan aluksia, kuten saaristolauttoja sekä sisävesialuksia. Pidempiä merimatkoja kulkevien aluksien hiilijalanjälkeä voidaan nykyisellään vähentää käyttämällä tavanomaisten polttoaineiden rinnalla uusia vaihtoehtoisia polttoaineita. Pidempää matkaa kulkeville aluksille täysin hiilineutraalia sekä kustannustehokasta vaihtoehtoa ei ole vielä kyetty toteuttamaan. Tässä työssä käsitellyillä polttoaineilla kuten LNG:llä voidaan huomattavasti vähentää hiilidioksidin sekä typen oksidipäästöjä, kunhan metaanin ohivuoto saadaan pidettyä hallinnassa. Pidemmällä aikavälillä tarkasteltaessa valitettavaa on, ettei tälläkään vaihtoehto saavuta IMO:n tavoitteita vuoteen 2050 mennessä.

Tiukentuvien päästövaatimuksien nojalla yhä useampi satama on asettanut sen välittömään läheisyyteen hiilineutraalitavoitteet. Alusten tulisi näissä satamissa pystyä lähestymään sekä kiinnittytymään laituriin ilman dieselmootoreiden aiheuttamia päästöjä. Alukset kuitenkin tarvitsevat rantautuessaan propulsiolle välttämätöntä mekaanista energiaa paljon. Rahtia kuljettavat alukset voivat pisimmillään viettää satamassa useita päiviä. Aluksilla on kuitenkin koko ajan tarve tuottaa sähköä sekä mahdollisesti lämpöä satamassa ollessaan.

Risteilijöillä ja matkustaja-autolautoilla tämä korostuu entisestään hotellialueen suuren energiatarpeen vuoksi. Ratkaisuna näihin vaatimuksiin satamat, varustamot sekä energiateollisuuden tahot ovat ryhtyneet kehittämään hiilineutraaleja vaihtoehtoja tuottaa satamiin sähköä. Varsinkin vety on nähty hyvänä vaihtoehtona tuottaa hiilineutraalia sähköä polttokennojen sekä akustojen avulla.

Kolmas ongelmakohta muodostuu tiettyjen polttoaineiden vaarallisuuden sidonnaisuuteen kuljettavaan rahtiin. Ihmisiä matkustajina kuljettaville aluksille turvallisuuden mitoitukset tulee saattaa erityisen korkealle tasolle. Työssä käsiteltävistä polttoaineista vaarallisimpia ovat vety sekä ammoniakki.

Vedystä tekee vaarallisen sen laaja syttymispitoisuusalue, kuten Liitteen 2 taulukosta 2 voidaan todeta, sekä sen palamiskäyttäytyminen. Ammoniakin haasteena tulee olemaan sen myrkyllisyys. Ihmiselle jopa lyhytkestoinen 5000 ppm altistuminen voi johtaa kuolemaan kurkunpään turpoamisen ja keuhkopöhön seurauksena. Ammoniakin palamiskäyttäytyminen vetyyn nähden on hillitympää. Kokeiden perusteella ammoniakin räjähdysmäinen palo tapahtuu todennäköisimmin suljetussa tilassa. (Tokeva 2021, 2023.)

Vedyn palamiskäyttäytyminen on erityisen vaarallista sekä riskialtista. Vedyn varastoinnissa käytettävä suuri paine voi aiheuttaa vuodon yhteydessä staattisen sähköpurkauksen, joka voi sytyttää kaasun itsestään. Vaaraa aiheuttaa myös vedyn palaessa sen näkymätön ja erittäin kuuma liekki. (Tokeva 2021, 2023.) Suurempien aluksien propulsiion tuottamiseksi vedyn varastoiminen riittävän energiatehokkaaseen muotoon on tällä hetkellä hankalaa ja kannattamatonta.

Tulevaisuuden näkymät näiden kahden polttoaineen käytölle risteilijöissä sekä matkustaja-autolautoissa ovatkin vielä epävarmoja. Mikäli järjestelmien turvallisuutta ei kyetä toteen näyttämään riittävästi, voi siitä muodostua uhka kehitystyölle.

Polttoaineiden säilytyksessä tulee ottaa huomioon BLEVE-ilmiö (Boiling liquid expanding vapour explosion). Ilmiössä säiliön läheisyydessä palava palokuorma tai muu lämmön lähde aiheuttaa säiliön lämpenemisen. Säiliön vaipan lämpötilan kohotessa sen sisältämä neste alkaa kiehua ja kaasuuntua. Nesteen kaasuuntuessa sen ominaistilavuus moninkertaistuu aiheuttaen radikaalin paineen nousun säiliössä. Säiliön sisäisen paineen kasvu aiheuttaa säiliön räjähdysvaaran. (Pelastusopisto, 2022.)

Nykyisten sääntöjen nojalla säiliöiden välittömässä läheisyydessä ei saa säilyttää ulkoisia syttymis- tai lämmönlähteitä. Järjestelmän sisäisen ongelman sattuessa tulee ilmiö ja vaaratilanne kuitenkin tunnistaa ja ehkäistä.

Toistaiseksi aktiivisessa käytössä käsiteltävistä polttoaineista on vain LNG. Kansainvälisen IGF-koodin, yleissopimuksen sekä luokituslaitosten sääntöjen mukaan mitoitettujen LNG-järjestelmien mahdolliset vuodot tai tulipalot ovat erittäin epätodennäköisiä. Suurin riskitekijä voi muodostua tilanteessa, jossa järjestelmän toimintaan vaikuttaa ulkoisia radikaaleja tapahtumia. Käytännön arviona suuren dynaamisen onnettomuuden syntymiseen vaadittaisiin useamman epäonnisen tapahtuman ketjureaktio.

Toistaiseksi käytössä olevat matalapäästöisemmät polttoainejärjestelmät ovat iältään varsin tuoreita. Riskitekijän tulevaisuudessa aiheuttaa laitteistojen sekä koneikkojen ikääntyminen ja kuluminen. On eriarvoisen tärkeää huomioida järjestelmien kunnon sekä toiminnallisuuden tutkiminen ja varmistaminen aluksen ikääntyessä. Mahdolliset huollot sekä korjaukset tulee myös suorittaa valmistajan ohjeiden mukaan rahaa säästämättä. Toiminnan tulee myös olla valvottua, jotta asennukset ja korjaukset tulee suoritettua oikein. Tämä on myös suunnittelijalle hyvä näkökulma suunnittelun tueksi. Järjestelmien suunnittelussa on tavoitteellista suunnitella ne helposti huollettaviksi, tarkastettaviksi sekä saavutettaviksi.

Haaste, joka liittyy erilaiseen toimintaympäristöön, on aina ollut ja tulee aina olemaan läsnä merenkulussa. Mantereella onnettomuuden sattuessa resursseja on lähtökohtaisesti aina hyvin tai vähintäänkin niitä on verrattaen nopeaa saada lisää. Haastavuutta onnettomuuteen luovat etäisyydet sekä alati muuttuvat ja erilaiset kohteet. Merenkulussa puolestaan aluksen henkilökunnalle onnettomuuskohte on aina sama ja henkilöstö tuntee lähtökohtaisesti aluksensa hyvin. Onnettomuuden sattuessa merillä, joutuu henkilökunta puolestaan toimimaan verrattaen pitkään omin avuin. Huonossa tilanteessa lisäresursseilla kestää kauan tavoittaa kohde. Myrskyisen sään tuomat vaikutukset ovat myös merellä huomattavasti suuremmat kuin mantereella.

5.2 Työn tavoitteiden toteutuminen

Työn tavoitteena oli luoda katsaus muutamien tulevaisuuden vaihtoehtoisten polttoaineiden ominaisuuksiin sekä paloturvallisuuteen. Työn on myös tarkoitus toimia uusien kokemattomien suunnittelijoiden ohjeaineistona sekä suunnittelua avustavana dokumenttina. Lopullinen materiaali, joka pystyttiin luomaan, ei täysin vastaa alkuperäistä haluttua, joskin tälle löytyy allekirjoittaneesta riippumattomia syitä. Alun perin oli tarkoitus ottaa kantaa myös paloa rajoittavien järjestelmien ja kaluston suunnitteluun sekä kehitykseen. Työn edetessä kuitenkin ilmeni, ettei erityisiä vaatimuksia polttoaineille ole niiden turvamarginaalien vuoksi. Turvamarginaaleilla tarkoitetaan sääntöjen nojalla suunniteltuja kokonaisuuksia, kuten tuuletettuja kaksoisputkia. Järjestelmien sekä kalustollisen tutkimuksen edellytyksenä olisi ollut tutkia polttoaineiden hallitsematonta palokäyttäytymistä.

Opinnäytetyötä tehtäessä pilottikohteita uusille vaihtoehtoisille polttoaineille oli maailmalla meneillään, tosin suljettujen tietolähteiden vuoksi tietoa oli vaikeasti saatavilla. Pilottiprojektien tiedottaminen oli vähäistä sekä yleisellä tasolla kirjoitettua. Työn tavoitteisiin peilaten olisi ollut tarvetta enemmän yksityiskohtaisille tiedoille järjestelmien kehitystyöstä. Omalta osaltaan tämä hankaloitti tiedonhakuja sekä sen saantia. Deltamarin Oy:n pilottiprojekteista sekä koneisto-osaston suunnittelijoilta sain mielenkiintoisia tiedonlähteitä sekä näkökulmia. Oma tausta pelastusalalta edesauttoi työn lähestymistä erilaisista ja monipuolisista näkökulmista.

Tiedon hankinnan vaikeuksista huolimatta, perustavanlaatuinen tutkimustyö polttoaineista ja palontorjunnan yleisestä tasosta kyettiin suorittamaan ja tämän dokumentointi toteuttamaan. Polttoaineiden suhteen tavoitteet saavutettiin, jolloin uusi suunnittelija voi tämän työn pohjalta tutustua polttoaineiden ominaisuuksiin yhden dokumentin avulla.

Uskon kuitenkin, että työ vastaa hyvin sille asetettua tavoitetta kehittää allekirjoittajan kykyä suorittaa alaa kehittävää työtä sekä omaa ammattitaitoa. Kuten aiemmin mainittu, vaatisi alkuperäisten tavoitteiden toteutuminen useamman tutkimus- sekä kehitystyön aihealueen tiimoilta. Tavoitteita muokattiinkin työn tekoaikana, jotta aihealuetta kyettiin rajaamaan. Eri alojen toimijoiden yhteinen työskentely tutkimusten parissa edesauttaisi saavuttamaan ammattimaisen sekä kiitettävän tasoisen työn. Alojen edustajia voisivat olla pelastuslaitoksen palontutkijat, MIRG-ryhmän jäsenet, varustamoiden edustajat sekä laitevalmistajien edustajat.

6 Yhteenveto

Tavoitteena oli käsitellä muutamien tulevaisuuden laivapolttoaineiden ominaispiirteitä sekä niiden paloturvallisuutta. Käsitellyt polttoaineet ovat eri teollisuuden aloille jo entuudestaan tuttuja. Meriliikenteelle kyseiset polttoaineet ovat varsin tuoreita tai jopa kokonaan uusia. Polttoaineista nesteytetty maakaasu sekä nestekaasu ovat jo tunnettuja meriliikenteen polttoaineita. Vety puolestaan on saanut vasta muutamia pilottikohteita, joiden operointia on aloitettu. Ammoniakki puolestaan on vielä tulevaisuutta, joskin uusien moottoreiden on arvioitu tulevan markkinoille vuonna 2024.

Tavoitteena oli myös luoda sellainen dokumentti, jota toimeksiantajayrityksen uudet suunnittelijat voivat käyttää suunnittelun ohjeaineistona. Paloturvallisuuden näkökulmasta uudet vaihtoehtoiset kaasumaiset polttoaineet ovat tavanomaisiin öljypohjaisiin verrattuna huomattavasti vaarallisempia. Normaalissa lämpötilassa ja paineessa kaasuina esiintyvät polttoaineet ovat tavanomaisiin nähden huomattavasti enemmän epästabiileja. Hallitsemattoman kaasuuntumisen seuraukset tulee tunnistaa ja pyrkiä ehkäisemään. Näin onkin toimittu, kuten esimerkiksi maakaasun kanssa, jossa kaikki kaasutettua polttoainetta sisältävät putket, ovat kaksoisvaipallisia sekä tuuletettuja.

Paloturvallisuuteen on yhä edelleen panostettava sekä kehitettävä sitä tulevaisuudessa. Ennaltaehkäisevällä toiminnalla, kuten mittareiden hyvällä monitoroinnilla voidaan pienetkin vuodot havaita nopeasti sekä pyrkiä vaikuttamaan tilanteen kehitykseen. Välineistö, jota palontorjuntaan tarvitaan, tulee valita ja mitoittaa kullekin polttoaineelle sopivaksi.

Työ herätteli kirjoittajaa uusiin tulevaisuuden haasteisiin sekä loi uutta näkökulmaa myös mantereella suoritettavaan pelastus- ja sammutustoimintaan. Opinnäytetyö kehitti ja antoi arvokasta tietotaitoa sekä kokemusta suunnittelu-uransa alussa olevalle suunnittelijalle.

Käsiteltävään aihealueeseen liittyy useita muita tutkinnallisia näkökulmia, jotka oli rajattava tämän työn ulkopuolelle. Suurempia tutkittavia kokonaisuuksia voisivat olla: aineiden palokäyttäytyminen, kaasumaisen palon vaikutus laivan teräksisiin rakenteisiin, pelastustoimen sekä merenkulun rajapinnan tarkastelu ja kehittäminen sekä laivan pelastushenkilökunnan suorituskykyvaatimukset.

Lähteet

ABB. 2022. Hydrogen installation. Syyskuu 2022. Luottamuksellinen dokumentti.

ABS. 2021. Hydrogen as Marine Fuel. Sustainability whitepaper. American Bureau of Shipping. June 2021. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>

ABS. 2022. LNG as Marine Fuel. Sustainability whitepaper. American Bureau of Shipping. July 2022. <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf>

ClassNK. 2023. Topics at IMO. Viitattu 23.2.2023
https://www.classnk.or.jp/hp/en/info_service/imo_and_iacs/topics_imo.html

Consilium. 2022. All Marine Products. Viitattu 15.1.2023.
<https://www.consiliumsafety.com/en/products/marine/#filter-term-273>

Deltamarin www-sivut 2022. Tietoa meistä. Viitattu 3.8.2022
<https://deltamarin.com/corporate/>

Demaco. 2022. Liquid Hydrogen Storage. Increasingly larger storage tanks. Viitattu 12.3.2023. <https://demaco-cryogenics.com/blog/liquid-hydrogen-storage/>

Det Norske Veritas. 2017. LPG as marine fuel. Group Technology & Research, Position paper. May 2017. <https://www.dnv.com/Publications/lpg-as-marine-fuel-95190>

Det Norske Veritas. 2020. Ammonia as a marine fuel. Group Technology & Research, Whitepaper. May 2020. <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>

Det Norske Veritas. 2021. LNG as marine fuel. Viitattu 20.9.2022.
<https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/index.html>

Det Norske Veritas. 2022. Rules for Classification. Ships-RU-SHIP, Part 6 Chapter 2. Viitattu 22.9.2022.
<https://standards.dnv.com/explorer/document/376B18602F2A4CAD89C296AC8ABC853E/26>

FSS code. 2022. Fire Safety Systems – Resolution MSC.98(73). Viitattu 17.1.2023.

Gasum. 2022. LNG-Puhdasta energiaa pohjoismaihin. Viitattu 10.10.2022.
<https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/lng/>

Global Maritime Forum. 2022. Ammonia as a shipping fuel. Forum news. Viitattu 12.10.2022. <https://www.globalmaritimeforum.org/news/ammonia-as-a-shipping-fuel>

Greene, S. 2023. Freight Transportation. Massachusetts Institute of Technology. Viitattu 15.2.2023. <https://climate.mit.edu/explainers/freight-transportation>

GRIT. 2023. LPG Characteristics. Viitattu 12.10.2022.
<https://gasesgrit.com/en/lpg-characteristics/>

IACS. 2023. Classification societies – their key role. Information paper. International Association of Classification Societies. Viitattu 23.2.2023.
<https://iacs.org.uk/media/8875/classification-societies-key-role.pdf>

IGF code. 2023. International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels. Viitattu 7.3.2023. Vaatii käyttäjätunnuksen.

International Maritime Organization. n.da. IMO`s work to cut GHG emissions from ships. Viitattu 5.9.2022.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Cutting-GHG-emissions.aspx>

International Maritime Organization. n.db. Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force. Viitattu 5.9.2022.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx>

International Maritime Organization. 2023. Introduction to IMO. Viitattu 5.9.2022. <https://www.imo.org/en/about/pages/default.aspx>

Maritime safety committee. 2022. Resolution MSC.99(73), Ch II-2, Part C. Viitattu 23.10.2022. Vaatii käyttäjätunnuksen.

Motiva. 2020. Kestävän kehityksen ratkaisut. Energialähteet. Vety.

Viitattu 13.2.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/valitse auto viis aasti/energialahteet/vety](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viis_aasti/energialahteet/vety)

Pelastusopisto. 2021. Tokeva 2021 – Online versio. Viitattu 18.1.2023.

<https://tokeva.fi/#/tervetuloa>

Pelastusopisto. 2022. Vaarallisten aineiden torjuntakurssi koulutusmateriaali. Luottamuksellinen materiaali.

SOLAS. 2022. International Convention for Safety of Life at Sea. Viitattu 16.1.2023. Vaatii käyttäjätunnuksen.

Sjölund, M. 2023. Haastattelu. Viking Linen MS Viking Gloryn konepäällikkö Marcus Sjölundia haastatteli 19.1.2023 Valtteri Rautalin.

Suomen Varustamot. n.d. Energy Efficiency Design Index. Ilmastosuojelu ja ilmastonmuutos. Viitattu 2.11.2022.

<https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/ilmastosuojelu-ja-ilmastonmuutos/energy-efficiency-design-index/>

STCW code. 2022. Seafarers` Training, Certification and Watchkeeping.

Viitattu 13.1.2023.

Työterveyslaitos. 2022. OVA-Ohjeet. Viitattu 20.1.2023. <https://www.ttl.fi/ova/>

UNCTAD 2022. Review of Maritime Transport 2022. Viitattu 10.10.2022.

https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022overview_en.pdf

Wärtsilä. 2020. Training material. Turku AMK. Laivan koneistot ja järjestelmät.

Viitattu 20.10.2022. Luottamuksellinen materiaali.

Vojvodic, A.; Medford, A.; Studt, F.; Abild-Pedersen, F.; Khan, T.; Bligaard, T. & Norskov, J.K. March 2014. Exploring the limits: A low-pressure, low-temperature Haber-Bosch process whitepaper.

Ympäristöministeriö. 2022. Pariisin ilmastopimus. Viitattu 1.9.2022.

<https://ym.fi/pariisin-ilmastopimus>

Liite 1. Laivan paloturvallisuutta edistävä suunnitteluohje

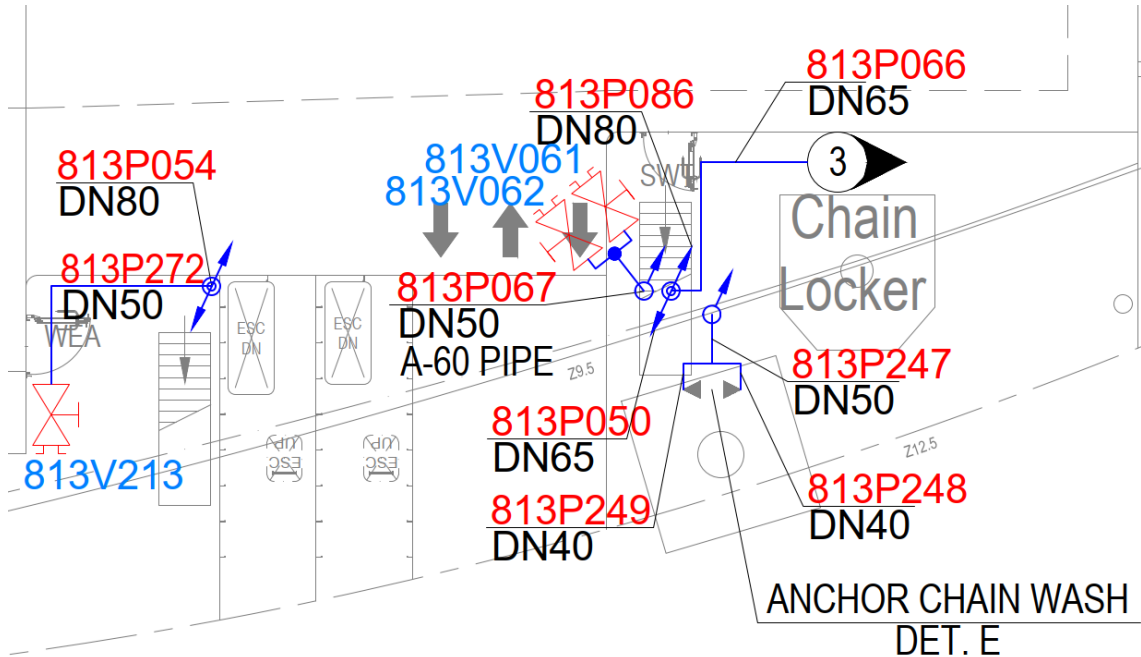
Suunnittelun aloituksessa ennen piirustusten aloittamista tulee suunnittelijan tutustua aluksesta tehtyyn sopimuserittelyyn. Dokumentissa on esitetty konseptivaiheessa suunnitellut sammutusjärjestelmät sekä näiden erityisvaatimukset. Mitoitukset on tehty sääntöjen sekä tilaajan omien vaatimusten nojalla. Suunnittelulla tulee saavuttaa erittelyssä esitellyt vaatimukset sekä kansainvälisissä säännöissä asetetut vaatimukset.

Ennen yksityiskohtaisempien piirustusten aloittamista on myös hyvä tutustua konseptivaiheessa tehtyihin piirustuksiin. Aiemmista piirustuksista voi selvittää suunnittelulle välttämättömiä asioita. Myös yleisellä tasolla osastokohtaisten rajapintojen tutkinta on tärkeää, jotta suunnittelijalla on ymmärrys asiayhteyksistä eri osastojen kesken. Suunnittelijan olisikin hyvä tutustua toisten alueiden sekä osastojen linjaviivoihin. On selvää, että yhteistyö muiden osastojen kanssa on tärkeää onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi.

Suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon luokituslaitoksen sekä kansainvälisen merenkulun yleissopimuksessa mainitut säännöt. Sääntöjä tulee tulkita oikein sekä noudattaa niitä. Sääntöjä tulkittaessa tulee täysin ymmärtää asiayhteydet sekä koko osion tarkoitus ja pyrkimys. Aluksen lippuviranomaisella voi myös olla omia tarkentavia vaatimuksia suunnittelulle.

Aloittelevan suunnittelijan on hyvä aloittaa työ tutkimalla vanhoja projekteja ja niistä tehtyjä piirustuksia. Piirustusten pohjalta suunnittelija voi saada arvokasta tietoa hyvästä suunnittelumallista. Aiemmin suunnittelussa dokumentissa voi olla hyvät edellytykset sen suunnittelun jäljentämiselle ja hyödyntämiselle. Sääntöjen uudistuessa ja muuttuessa tulee kuitenkin niiden pohjalta etupainotteisesti toteuttaa suunnittelu. Alukset ovat myös lähes aina uniikkeja, jolloin tulee huomioida rakenteelliset eroavaisuudet alusten kesken.

Suunnittelua aloittaessa on myös hyvä varmistua käytettävistä piirrosmerkeistä sekä yleisellä tasolla käytettävästä piirtotavasta. Tilaajilla, telakoilla sekä suunnittelutoimistoilla voi olla toisistaan eroava toimintamalli piirustusten tekemisessä.



Kuva 16. Ote laivan palovesikaaviosta.

Kaavioiden piirtämisen yhteydessä sääntöjen ja normien lisäksi on hyvä ottaa huomioon niin sanottu "human factor". Tässä yhteydessä termillä tarkoitetaan ihmisen omaa toimintaa ja sen seurauksia. Säännöt ja vaatimukset eivät välttämättä ohjaa suunnittelemaan käytännöllistä ja käytettävää konstruktioita. Aluksen tilaajalla voi myös olla omia mielipiteitä ja vaatimuksia järjestelmien parhaan mahdollisen käytettävyyden saavuttamiseksi. Olisi hyvä asettaa itseään ajatuksen tasolla tilanteeseen, jossa joutuu käyttämään suunnittelijan suunnittelemaa järjestelmää. Hyvä ja yksinkertainen esimerkki tilanteesta on palovesikaavion suunnittelu. Sääntöjen nojalla mitoitettavat linjat olisi hyvä itse ajatuksen tasolla katsoa hyvin käytettäviksi. Sama ajattelumalli pätee myös muihin suunniteltaviin kokonaisuuksiin, kuin mitä tässä opinnäytetyössä on käsitelty.

Liite 2. Polttoaineiden ominaisuuksia

Taulukko 1. Polttoaineiden fysikaalisia ominaisuuksia. (Rautalin 2023).

Molekyylikaava / Kemiallinen	Aineen nimi	Kaasun tiheys [kg/m ³]	Nesteen tiheys [kg/m ³]	Kiehumispiste [°C]	Energiatiheys [MJ/kg]
CH ₄	Maakaasu	0,68	430	-162	50
C ₃ H ₈	Nestekaasu	1,83	500	-42	46,1
NH ₃	Ammoniakki	0,73	696	-33	22,5
H ₂	Vety	0,09	70,8	-253	120
	HFO		991	150	40,2

Taulukko 2. Polttoaineiden palofysikaalisia ominaisuuksia. (Rautalin 2023).

Molekyylikaava / Kemiallinen	Aineen nimi	Syttymisrajat [%]			Itsesyttymis- lämpötila [°C]	YK- Numero
		Alempi	Ylempi	Δ %		
CH ₄	Maakaasu	4,4 %	17 %	12,6 %	595	1971
C ₃ H ₈	Nestekaasu	2 %	10 %	8,0 %	450	1075
NH ₃	Ammoniakki	16 %	25 %	9,0 %	650	1005
H ₂	Vety	4 %	75,6 %	71,6 %	560	1049
	HFO	1 %	6 %	5,0 %	400	1202