



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JOONAS TOIVONEN

Litiumakustojen käyttö ja turvallisuus aluksilla

MERENKULUN TUTKINTO-OHJELMA
2022

| | | |
|---|-------------------------------------|----------------------------|
| Tekijä Toivonen, Joonas | Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK | Päivämäärä lokakuu 2022 |
| | Sivumäärä 25 | Julkaisun kieli Suomi |
| Julkaisun nimi Litiumakustojen käyttö ja turvallisuus aluksilla | | |
| Tutkinto-ohjelma Insinööri, merenkulku (AMK) | | |
| Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia litiumakustojen käyttöä ja niiden turvallisuutta laivaympäristössä. Yhä lisääntyvä litiumakustojen käyttö aluksilla luo hyötyjen lisäksi myös riskejä, joita tässä työssä tutkittiin.</p> <p>Työn tavoitteena oli perehtyä akustojen rakenteellisiin hyötyihin ja muutamaa esimerkkikohteeseen, akustojen kunnossapitoon sekä paloturvallisuuteen. Lopuksi esiteltiin erilaisia sammutusjärjestelmiä akustoille.</p> <p>Työ toteutettiin hyödyntämällä aiempia tietoja ja tutkimuksia litiumakuista. Lisäksi työssä tutustuttiin luokituslaitoksen sääntöihin.</p> | | |
| Asiasanat litiumioniakut, paloturvallisuus | | |

| | | |
|--|--|-------------------------------------|
| Author Toivonen, Joonas | Type of Publication Bachelor's thesis | Date October 2022 |
| | Number of pages 25 | Language of publication: Finnish |
| Title of publication Operation and safety of lithium batteries on ships | | |
| Degree program Maritime engineering | | |
| Abstract The purpose of this thesis was to study use and safety of lithium batteries on vessels. Increased use of lithium batteries on vessels creates also benefits but risks which were studied in this thesis. The goal of this thesis was to study structural benefits of lithium batteries and introduce few vessels installed with them. After that next step was to study maintenance and fire safety of lithium batteries. At the end few extinguisher systems were introduced. The thesis was carried out with using information and research found at internet. Rules of classification organization were also studied. | | |
| Key words lithium-ion batteries, fire safety | | |

SISÄLLYS

| | |
|--|----|
| 1 JOHDANTO | 5 |
| 2 AKUSTOJEN RAKENTEELLISET HYÖDYT | 6 |
| 2.1 Litium-ioniakuista yleisesti..... | 6 |
| 2.2 Täyssähköiset alukset..... | 7 |
| 2.2.1 MF Ampere..... | 8 |
| 2.3 Hybridialukset..... | 9 |
| 2.3.1 MS Color Hybrid | 10 |
| 3 KUNNOSSAPITO | 12 |
| 3.1 Akustonvalvontajärjestelmä..... | 12 |
| 3.2 Akkuhuone | 12 |
| 3.3 Valvottavia kohteita | 13 |
| 3.3.1 Lämpötila..... | 13 |
| 3.3.2 Akustojen varauksen lataaminen & purkaminen..... | 14 |
| 3.3.3 Valmistusvirheet | 14 |
| 3.3.4 Sammutusjärjestelmien toiminnan varmistaminen..... | 15 |
| 4 PALOTURVALLISUUS | 16 |
| 4.1 Luokituslaitoksen säädöksiä..... | 16 |
| 4.1.1 Sijainti ja järjestelyt | 16 |
| 4.1.2 Ilmanvaihto | 16 |
| 4.2 Vaaralliset kaasut | 17 |
| 4.3 Sammutus..... | 18 |
| 4.4 Jäähdytys | 19 |
| 5 SAMMUTUSJÄRJESTELMÄT | 20 |
| 5.1 Luokituslaitoksen säädöksiä..... | 20 |
| 5.2 HI-FOG-vesisumujärjestelmä | 20 |
| 5.3 Novec 1230 | 22 |
| 5.4 Vaahtojärjestelmä..... | 23 |
| 5.5 F-500 sammuttimet | 24 |
| 6 YHTEENVETO | 25 |
| LÄHTEET | |

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkittiin litiumakustojen käyttöä ja turvallisuutta laivaympäristössä. Aihe on sinänsä ajankohtainen, koska akustojen käyttö tulee lisääntymään uusissa laivoissa. Työssä on käytetty pääasiassa internetistä löytyneitä tutkimuksia litiumakkupaloista ja niiden sammuttamisesta sekä luokituslaitoksen sääntöjä niihin liittyen. Työn tarkoituksena oli tehdä selvitys akustojen käytöstä ja paloturvallisuudesta sekä samalla lisätä omaa tietämystä asiasta.

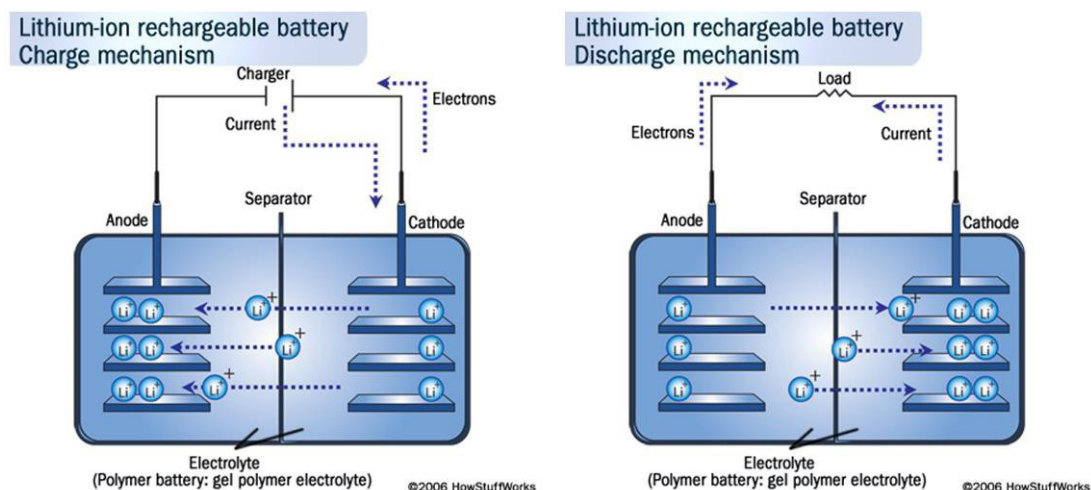
2 AKUSTOJEN RAKENTEELLISET HYÖDYT

Laivoista aiheutuvat hiilidioksidi-, rikkioksidi- ja typenoksidipäästöt ovat merkittävät, sillä arviolta 80 % maailmankaupasta kulkee meriteitse. Tämän takia näitä päästöjä halutaan vähentää. Varaamalla sähköenergiaa litiumakustoihin, polttomoottorien käyttö vähenee (Youd 2021). Pääsääntöisesti akustojen käyttö laivoilla on toteutettu joko täyssähköisesti tai hybridinä.

Akustoilla on monia hyötyjä ja käyttötarkoituksia aluksilla, riippuen aluksesta. Ne voivat olla niin sanotusti varalla, jolloin sähköenergian tarpeen noustessa ei tarvitse käynnistää generaattoria. Ne voivat myös tasoittaa äkillisestä ja lyhytaikaisesta sähköenergian tarpeen noususta johtuvaa virtapiikkiä. Toisaalta akustoilta saatava sähkövirta on heti käytettävissä, eikä tarvitse odottaa generaattorin käynnistymistä ja tahdistumista sähköverkkoon. Lisäksi akustot voivat toimia varavirtalähteinä aluksen kriittisille laitteille sähkökatkoksen sattuessa (EMSA 2020, 73).

2.1 Litium-ioniakuista yleisesti

Litiumakku on sähkökemiallinen laite, joka pystyy purkamaan ja varastoimaan sähköenergiaa negatiivisen ja positiivisen elektrodien (anodi ja katodi) välillä tapahtuvasta hapettumis-pelkistymisreaktiosta. Akun varausta purettaessa hapettumisen seurauksena negatiivinen elektrodi (anodi) vapauttaa elektroneja, jotka kulkevat ulkoisen piirin kautta positiiviselle elektrodille (katodi) synnyttäen sähkövirran. Samalla katodin vastaanottaessa elektroneja se aiheuttaa pelkistymisreaktioita. Ladattaessa reaktio tapahtuu vastakkaiseen suuntaan (Greencycle www-sivut 2021). Kuvassa 1 on esitetty litiumakun toimintaperiaate.



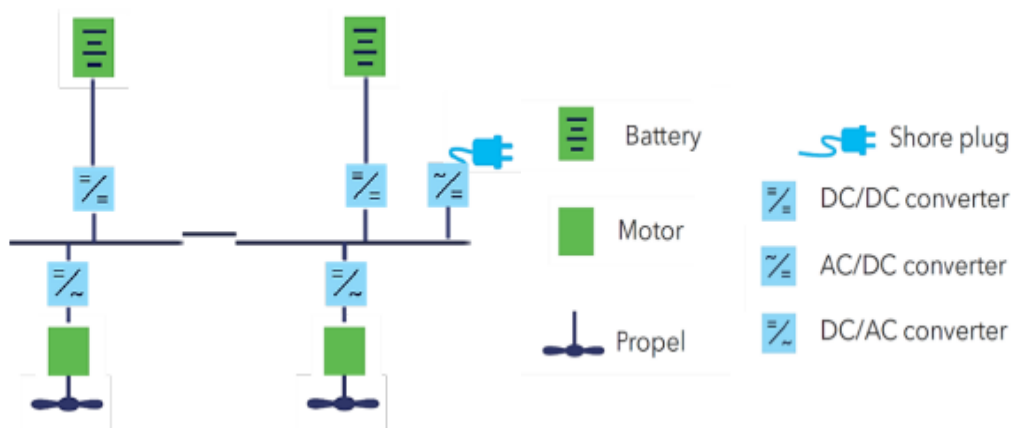
Kuva 1. Litium-ioniakun toimintaperiaate ladattaessa ja purettaessa varausta (EMSA 2020, 12.)

Litiumakkujen hyötyinä ovat pitkä käyttöikä sekä hyvä kyky varastoida energiaa muihin akkuihin verrattuna. Haittapuolina on valmistusmateriaalien saatavuus, helposti syttyvä elektrolyytti sekä korkea hinta ja valmistuskustannukset. Elektrodeissa käytettävien eri seoksien ja materiaalien avulla voidaan säädellä akun hintaa, käyttöikää sekä energiatehokkuutta. (EMSA 2020, 13–15.)

2.2 Täyssähköiset alukset

Täyssähköisiä laivoja ei ole vielä kovinkaan montaa, sillä vaadittava sähköenergia laivan liikutteluun on suuri, jolloin akustojenkin on oltava isoja. Lisäksi näiden akkujen lataaminen tapahtuu satamassaolon aikana, jolloin latauksen on oltava riittävän nopeaa ja turvallista. Toisaalta tällaiset alukset ovat täysin päästöttömiä, koska niissä ei ole polttomoottoreita. (EMSA 2020, 76.)

Täyssähkölaivat ovat pääsääntöisesti pieniä auto- tai matkustajalauttoja. Alusten siirtymävälit ovat pieniä, jolloin sähköenergiaa ei tarvita niin paljon sekä lataaminen saadaan suoritettua nopeasti laiturissa kiinnitettynä. Tulevaisuudessa akkuteknologian kehittyessä isommatkin alukset saattavat pystyä toimimaan pelkällä sähköllä. Kuvassa 2 on esitetty esimerkki täyssähkölaivan propulsiosta.



Kuva 2. Esimerkki täyssähkölaivan propulsiojärjestelmästä. (EMSA 2020, 76.)

2.2.1 MF Ampere

MF Ampere (kuvassa 3) on Norledin omistama maailman ensimmäinen täyssähköinen litiumakustolla toimiva suurehko autolautta, joka valmistui 2015. Se on 81 m pitkä ja 21 m leveä. Autoja kyytiin mahtuu 120 ja matkustajia 350. Se liikennöi Norjassa Sognevuonossa Lavikin ja Oppedalin välillä. Matka kestää 20 minuuttia, jonka jälkeen lautan akustoja ladataan laiturissa 10 minuuttia. Yöllä lautan ollessa laiturissa akut ladataan täyteen. (EMSA 2020, 53.)

Lautalla on 10 000 kg:n edestä akkuja, joiden kapasitanssi on yhteensä 1000 kWh. Yhteen ylitykseen kuluu arviolta 200 kWh. Molemmilla puolilla laitureilla on latausasema, joilla on virtapanakit lautan latausta varten. Virtapankeille tuli tarvetta, koska sähköverkosta ei saatu riittävästi sähköä lautalle. Näin ollen latausasemilla olevat virtapanakit ladataan täyteen, josta lautta lataa akustonsa. (EMSA 2020, 54.)

Akustojen käytöllä on säästetty käyttökustannuksia 80 % verrattuna siihen, jos lautassa olisi polttomoottori. Tämän ansiosta valtava määrä dieseliä on säästynyt sekä niistä syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei ole muodostunut. Lautta tekee päivässä 34 matkaa ja näistä toteutuvat käytännössä kaikki lukuun ottamatta huonosta kelistä johtuvia peruutuksia, joten alun hankaluudet latausasemien kanssa selätettyä se on erittäin varmatoiminen. (EMSA 2020, 54.)



Kuva 3. MF Ampere (Wikipedia)

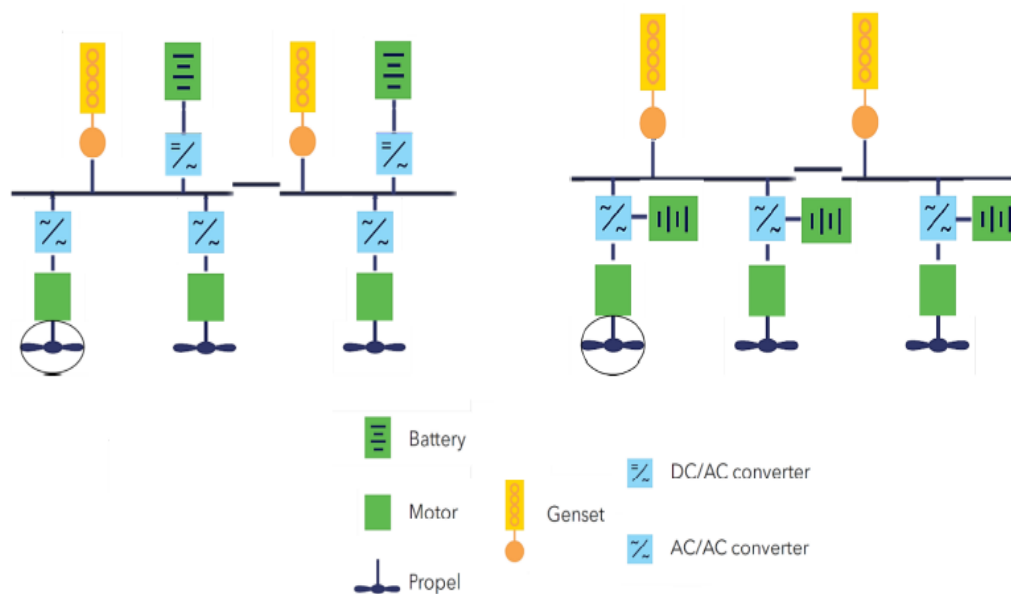
2.3 Hybridialukset

Perinteisten polttomoottorien kanssa käytettävät akustot, eli hybridialukset ovat tänä päivänä yhä yleisempiä uusissa laivoissa. Laivassa voi olla esimerkiksi polttomoottorilla toimiva mekaaninen potkuri, ja generaattorit tuottavat tarvittavan sähkön. Alukselle on myös asennettu akusto, jonka tarkoituksena on estää generaattorien liiallinen kuormitus äkillisessä sähköenergian tarpeen nousussa. Tällöin generaattori ei rasitu ja niitä voidaan ajaa pienemmällä kuormalla. Kuvassa 4 on esitetty esimerkkejä hybridilaivan propulsioista.

Aluksen propulsioon ollessa sähköinen, akustoja voidaan käyttää generaattorien rinnalla. Akustojen tarkoitus on antaa sähkövirtaa aluksen potkureille, jotta generaattorit eivät kuormittuisi. Tällaisen ratkaisun on todettu vähentävän aluksen meteliä ja värinää, joka taas lisää matkustusmukavuutta. Yleensä laivaan tehdään samalla maasähkö, jolloin akkuja voidaan ladata sataman sähköverkon avulla eli generaattorien ei tarvitse ladata akustoja. Lisäksi akustot voidaan suunnitella niin, että satamassa oloaikana alus ottaa sähköenergian pelkistä akuista, jolloin generaattorien ei tarvitse olla käynnissä. Tällöin laiva on nollapäästöinen ollessaan satamassa. (EMSA 2020, 74.)

Akustot voidaan myös kytkeä suoraan potkuriin moottoreille. Tämä ratkaisu on hyvä sellaisille aluksille, jotka tarvitsevat suurta työntövoimaa potkureille. Tällöin akuista

saatava sähköteho on parempi, koska muuttajista aiheutuva häviö on pienempi. Edellisessä kappaleessa olleessa vaihtoehdossa akuston ja moottorin välillä on kaksi muuttajaa, jotka aiheuttavat arviolta 2 % häviön verrattuna siihen, kun akusto on kytkettynä suoraan moottoriin, jolloin riittää vain yksi muuttaja. (EMSA 2020, 75.)



Kuva 4. Esimerkkejä hybridilaivan propulsiojärjestelmistä. (EMSA 2020, 75.)

2.3.1 MS Color Hybrid

MS Color Hybrid (kuva 5) on dieselsähköinen hybridilaiva, joka valmistui elokuussa 2019. Se on 160 m pitkä ja 27 m leveä. Matkustajia mukaan mahtuu 2000 ja autoja 500. Se liikennöi Norjan Sandefjordin ja Ruotsin Strömstadin välillä matkan kestäessä 2h 30 min. Laivan akustoja ladataan yön aikana sataman sähköverkon kautta sen ollessa kiinnittyneenä laituriin. (Color Line www-sivut 2021.)

Laivalla on neljä Rolls-Roycen polttomoottoria, jotka tuottavat sähköä propulsiolle. Niiden lisäksi laivaan on asennettu 65000 kilogramman edestä akustoja, joista irtoaa tehoa 5000 kWh. Pelkällä akustolla laiva pystyy kulkemaan tunnin ajan 12 solmun vauhtia. Matkavauhti merellä on 17 solmua. Alus käyttääkin pelkästään akkuja satamaan tulon ja lähdön aikana, jolloin polttomoottoreista lähtevää melua ei synny ollenkaan, mikä voi olla haitaksi sataman lähistöllä asuville. (Color Line www-sivut 2021.)



Kuva 5. MS Color Hybrid (Wikipedia)

3 KUNNOSSAPITO

Litiumakustot ovat melko huoltovapaita. Niiden käytönaikainen tarkkailu ja turvalaitteiden säännöllinen testaaminen ovat käytännössä tarvittavia huoltoja. Akun vaurioitussa tai hajotessa se pitää käytännössä aina vaihtaa uuteen, joten niiden korjaaminen ei ole mahdollista. Akustonvalvontajärjestelmän toiminta on myös tärkeää.

3.1 Akustonvalvontajärjestelmä

Akustonvalvontajärjestelmän (Battery Management System, BMS) on asennettava luokituslaitoksen mukaan kaikkiin aluksiin, joissa on käytössä akustoja. Sen tarkoituksena on seurata akuston jännitettä ja lämpötilaa, jonka kohoaminen on haitaksi paloturvallisuuden kannalta. Sen tehtäviin kuuluu estää akuston ylilataaminen tai ylipurkautuminen, suojata ylivirralla, -jännitteeltä ja alijännitteeltä sekä tasata kennojen välisiä jännite-eroja. Vikatilanteissa järjestelmä antaa hälytyksen tai kriittisemmissä tilanteissa irrottaa akuston automaattisesti irti laivan sähköverkosta. Lisäksi akustolle on asennettava valvontajärjestelmästä erillinen ylilataussuoja, joka tarkkailee ylilatautumista joko lämpötilan tai jännitteen avulla. (DNV AS 2021, 40–41.)

3.2 Akkuhuone

Akustot sijaitsevat laivassa akkuhuoneessa. Jos aluksella on paljon akustoja, ne tulisi jakaa eri huoneihin ja piireihin, jolloin tulipalon syttyessä palokuorma on pienempi. Akkujen kiinnityksestä tulee huolehtia, sillä kovassa merenkäynnissä niiden tulisi pysyä paikoillaan. Löystyneet liitokset akun navoissa voivat aiheuttaa kipinöintiä ja lämpötilan nousumista, joka taas edesauttaa palon syttymistä. Akut eivät saisi altistua kovalle iskuille, koska niiden kennot alkavat sylkemään ulos myrkyllisiä kaasuja, mikäli kenno puhkeaa. Akut ovat kuitenkin suojattu vahvalla muovikuorella, joten iskujen on oltava melko kovia. Kuvassa 6 on esimerkki akkuhuoneesta.

Akkuhuoneen ilmastoinnista tulee myös huolehtia. Akkujen lämmitessä ympäröivä ilma lämpenee, joten viileän ilman saaminen on tärkeää. Toisaalta akun kennon

hajotessa tai tulipalossa syntyvistä myrkyllisistä kaasuista pääsee myös eroon hyvällä ilmanvaihdolla. (Bhattacharjee S. 2021.)



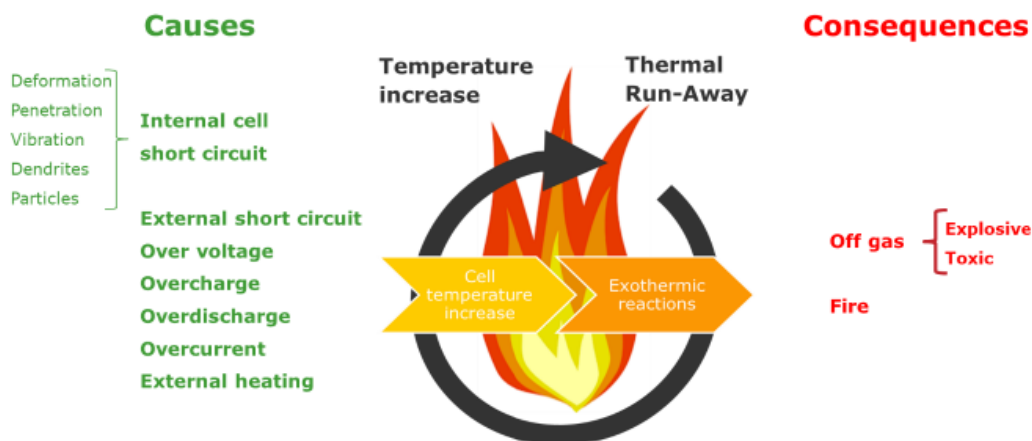
Kuva 6. Laivan akkuhuone (BBC)

3.3 Valvottavia kohteita

Akustojen tärkein tarkkailtava kohde on niiden lämpötila, koska monissa vikatilanteissa niiden lämpötila alkaa nousemaan. Akustonvalvontajärjestelmän toimiessa oikein sen pitäisi kytkeä akustot irti verkosta vikatilanteissa, mutta visuaalinen tarkkailu ei ole haitaksi.

3.3.1 Lämpötila

Akun kennojen liian korkea lämpötila saattaa sytyttää sen palamaan, jolloin se herkästi leviää muihin kennoihin ja akkuihin. Tätä kutsutaan lämpöryntäämiseksi (englanniksi thermal runaway). Tällaisissa paloissa on korkeat lämpötilat ja vaarallisia kaasuja, joten akkujen lämpötilojen tarkkailu on tärkeää. Akkuja pitää jäähdyttää normaalin käytön aikana esimerkiksi nestejäähdytyksellä, joka on tehokas tapa. Tällöin on kuitenkin huolehdittava sen toimivuudesta. Kuvassa 7 on esitetty lämpöryntäykseen johtavia syitä ja seurauksia.



Kuva 7. Syytä ja seurauksia lämpöryntäyksessä. (DNV GL AS 2019, 8.)

Myös liiallinen kylmyys on haitaksi akuille. Jos lämpötila laskee alle suunnitellun, akun hyötysuhde laskee, sisäinen resistanssi nousee sekä mahdollisesti aiheuttaa oikosulun ja elektrolyytin lämpenemisen. Tällaiset kylmät lämpötilat ovat kuitenkin sisätiloissa harvinaisia, mutta tämä on syytä huomioida akkujen turvallisuudessa. (EMSA 2020, 139–140.)

3.3.2 Akustojen varauksen lataaminen & purkaminen

Akkujen ylilatautuessa niiden jännite nousee suuremmaksi, mitä niiden on tarkoitus kestää. Tällöin lämpötila akussa alkaa nousemaan, jolloin riskinä on elektrolyytin kaasuuntuminen herkästi syttyväksi seokseksi. Tämä voi johtua akustonvalvontajärjestelmän virheellisestä toiminnasta, akun kennojen välisistä jännite-eroista tai oikosulusta. (EMSA 2020, 139.)

Ylipurkautuminen on ylilataamisen vastakohta, jossa akuston jännite laskee liian alhaiseksi, mitä sen olisi tarkoitus kestää. Se saattaa aiheuttaa elektrolyytin kaasuuntumisen samalla tavalla kuin ylilataaminen. Akunvalvontajärjestelmän toimiessa oikein sen pitäisi estää molemmat skenaariot. (EMSA 2020, 139.)

3.3.3 Valmistusvirheet

Akkujen kunnossapitoon ja turvallisuuteen liittyen ehkäpä vaikein epäkohta korjata on valmistuksessa tulleet viat. Näitä on käytännössä mahdotonta huomata eikä

akunvalvontajärjestelmäkään pysty tähän. Esimerkkinä akun kenno voi mennä oikosulkuun, jolloin se lämpenee. Tällaista vikaa ei voi huomata, ennen kuin se tapahtuu.

Käytännössä tällaiset riskit voidaan ehkäistä valitsemalla tunnettu valmistaja, joka käyttää hyvänlaatuisia materiaaleja. Toisaalta valmistusvaiheessa voi sattua virheitä, jolloin akun turvallisuus voi heikentyä. Asennettavien kennojen määrä on valtava, jolloin väkisinkin on mahdollisuus virheille. (EMSA 2020, 140.)

3.3.4 Sammutusjärjestelmien toiminnan varmistaminen

Akustojen kunnossapitoon liittyy sammutusjärjestelmien säännöllinen testaaminen ja määräaikaishuoltojen noudattaminen. Pahimman sattuessa sammutusjärjestelmien tulisi toimia toivotulla tavalla, jotta palo saataisiin mahdollisimman nopeasti hallintaan. Esimerkiksi miehistön kesken järjestettävien paloharjoitusten yhteydessä voidaan aika ajoin testata näitä järjestelmiä, jolloin taataan niiden toimivuus sekä miehistön osaaminen laitteiden käytöstä.

4 PALOTURVALLISUUS

Akkuhuoneen suunnittelu ja toteutus on tärkeää paloturvallisuuden kannalta. Mitä nopeammin palo havaitaan ja sammutus aloitetaan, sitä todennäköisemmin se saadaan hallintaan. DNV GL luokituslaitos on tehnyt sääntöjä ja ohjeita, miten akkuhuone toteutetaan mahdollisten tulipalojen tai muiden onnettomuuksien varalta.

4.1 Luokituslaitoksen säädöksiä

DNV GL säännöissä on mainintaa seuraavista kohteista akkuhuoneissa:

4.1.1 Sijainti ja järjestelyt

Akkuhuoneen tulee sijaita aluksen törmäyslaipion takana, eikä huoneessa saa olla muita laitteistoja, kun akustoihin liittyviä. Katon rajassa olevat koneet ja laitteistot tulee suojata ja eristää korkeilta lämpötiloilta sekä myrkyllisiltä kaasuilta. Akkuhuoneeseen ei saa asentaa putkia, ettei akustot kärsi mahdollisista vuodoista. Mikäli putkia ei saa asennettua muualle, kuin laitteistojen läheisyyteen, niissä ei saa olla laippoja tai liitoksia. Myöskään paloposteja ei saa asentaa akkuhuoneisiin. (DNV AS 2021, 33.)

4.1.2 Ilmanvaihto

Akkuhuoneisiin tulee asentaa ilmanvaihtojärjestelmä, ja sen tulee aktivoitua, mikäli tilassa olevista akuista alkaa tulemaan myrkykkaasuja. Ilmanvaihtojärjestelmän tulee olla irrallaan muista aluksen ilmanvaihtokanavista sekä kanavien tulee olla tiiviitä, korkeita lämpötiloja kestäviä sekä putkien materiaalin on oltava terästä. Ulkopuolella olevat ilmanvaihdon sisä- ja tuloilman putket tulee sijoittaa siten, että mahdolliset myrkykkaasut eivät ole vaaraksi miehistölle tai matkustajille. Akkuhuoneen sisällä tuloilma tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle lattianrajaa ja poistoilma mahdollisimman lähelle katonrajaa, kuitenkin maksimissaan 40 cm päästä katonrajasta. (DNV AS 2021, 28–29.)

Ilmanvaihdon käynnistys ja pysäytys tulee sijoittaa akkuhuoneen ulkopuolelle. Järjestelmän tuulettimien tulee saada virtaa kahdesta eri piiristä, toinen normaali- ja toinen hätävirransyötöstä. Akkuhuonetilan lämpötilan ja tuulettimien seuranta tulee sijoittaa miehitettyyn tilaan, esimerkiksi konevalvontaan. Samaan paikkaan pitää tulla hälytys, mikäli akkuhuoneen lämpötila nousee tai ilmanvaihtojärjestelmässä on häiriö. (DNV AS 2021, 30.)

Akkuhuoneeseen tulee myös asentaa kaasunhavaitsemisjärjestelmä myrkyllisten kaasu- ja kaasujen varalta, joka irrottaa akustot sähköverkosta, antaa hälytyksen komentosillalle ja käynnistää tuulettimet. Nämä toimenpiteet tapahtuvat automaattisesti, kun tilassa on riittävä määrä myrkkukaasuja. Lisäksi tätä järjestelmää tulee pystyä tarkkailemaan miehitettyssä tilassa, johon myös tulee ilmoitus mahdollisista hälytyksistä. (DNV AS 2021, 31.)

4.2 Vaaralliset kaasut

Litiumakkujen palo on yleisesti ottaen yhtä myrkyllistä, kuin palava muovi. Palon edessä on kuitenkin mahdollista, että alkaa muodostumaan vaarallisimpia kaasuja, kuten vetyfluoridia, vetysyanidia ja bentseeniä. Koska pienetkin määrät kyseisiä kaasuja tekevät ilmasta myrkyllistä, tulee kyseisessä tilassa käyttää tarvittavia suojavarusteita. (DNV GL AS 2019, 22.)

Taulukossa 1 on kerrottu palossa muodostuvia kaasuja sekä kaasuntiheys (relative vapor density) verrattuna ilmaan. Koska ne ovat tiheydeltään eriarvoisia, kuin ilma, niin ne kerrostuvat, jolloin kevyemmät kaasut nousevat katonrajaan ja raskaammat lattian lähelle. Kaasumittauksia tulee suorittaa eri korkeuksilla, jotta ne havaittaisiin. Kerrostunut kaasu ei kuitenkaan voi pysyä sellaisenaan pitkään suljetussa tilassa, joten se sekoittuu ilman kanssa. Tällöin on tärkeää mitata kaasupitoisuudet ilmassa, koska tällaiset sekoitukset voivat olla räjähtäviä niiden myrkyllisyyden lisäksi. Tutkimuksen mukaan vaarallisimmat kaasut litiumakkupaloissa ovat hiilimonoksidi, vetykloridi ja typpioksidi. (DNV GL AS 2019, 22.)

Taulukko 1. Palossa muodostuvia kaasuja (DNV GL AS 2019, 22.)

| Gas | Max % observed from cell level | L of specific gas per Ah (assuming 2.6 total L/Ah) | Immediately dangerous to life or health (IDLH) [ppm] | Relative Vapor density (air = 1) |
|--|--------------------------------|--|--|----------------------------------|
| CO | 38.1% | 0.9906 L/Ah | 1200 | 0.97 |
| NO ₂ | 9.7% | 0.2522 L/Ah | 20 | 2.62 |
| HCL | 9.7% | 0.2522 L/Ah | 50 | 1.3 |
| HF | 3.7% | 0.0962 L/Ah | 30 | 0.92 |
| HCN | 0.7% | 0.0182 L/Ah | 50 | 0.94 |
| C ₆ H ₆ (benzene) | 13.6% | 0.3536 L/Ah | 500 | 2.7 |
| C ₇ H ₈ (toluene) | 4.1% | 0.1066 L/Ah | 500 | 3.1 |

4.3 Sammutus

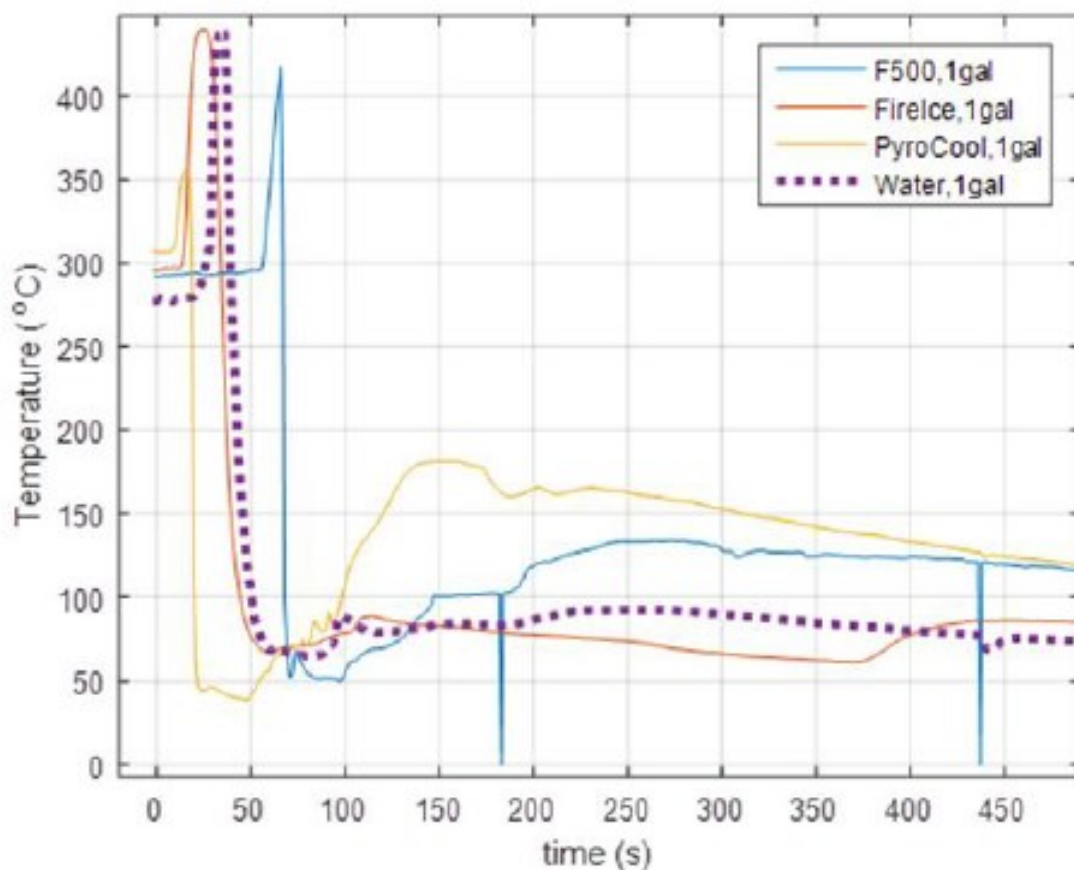
DNV GL:n tekemän tutkimuksen mukaan akkupalot saadaan sammutettua monellakin eri sammuttimella, mikäli niitä käytetään välittömästi lämpötilan nousun tapahduttua, jolloin estetään lämpöryntääminen. Parhain lopputulos kuitenkin saavutettiin veden kanssa, joka sekä sammuttaa että jäähdyyttää akustoa. (ConEd 2017, 45.) Vettä tuleekin varata riittävästä, jotta akusto saadaan jäähdyytettyä tarpeeksi, eikä se syttyisi palamaan uudestaan. Esimerkiksi vuonna 2021 Texasissa Tesla sähköauto ajoi kolarin, jonka seurauksena se syttyi palamaan, ja paloi monta tuntia, koska sitä ei saatu jäähdyytettyä tarpeeksi tehokkaasti. Tämän takia se syttyikin aina uudestaan palamaan. Lopulta, kun palo oli saatu hallintaan, vettä oli kulunut hieman yli 100000 m³. (Blanco 2021.) Sähköautoissa on huomattavasti pienemmät akustot, kuin laivoissa, joten vettä täytyy varata riittävästi.

Tutkimuksessa myös todettiin, että D-luokan sammuttimien (jotka ovat tarkoitettu metallipalojen sammutukseen, kuten alumiini, magnesium, litium jne.) käyttäminen ei tuo

hyötyjä veteen verrattuna. Palo kehittyy niin nopeasti, jolloin sammutinainetta vaaditaan paljon. Veden saaminen on yleisesti ottaen helpompaa. (ConEd 2017, 45.)

4.4 Jäähdytys

Kuten edellisellä sivulla todettiin, on palavien akustojen jäähdytys todella tärkeää palon hillitsemisessä, vaikka savua tai liekkejä ei olisi. Tällä tavoin estetään lämpöryntääminen. Tähän tarkoitukseen vesi on parhain ratkaisu, kuten kuvasta 8 nähdään. Testissä käytettiin neljää eri sammutusainetta, kolmea eri sekoitetta veden kanssa sekä pelkkää vettä. Parhain tulos saatiin pelkällä vedellä, joka pitää kennon maksimilämmön alle 100 °C asteessa. Lisäaineet veteen sekoitettuna eivät tuoneet varsinaista hyötyä. (ConEd 2017, 45–47.)



Kuva 8. Eri sammutusaineiden jäähdytyskykyä. (ConEd 2017, 46.)

5 SAMMUTUSJÄRJESTELMÄT

Tässä kappaleessa perehdytään luokituslaitoksen määräyksiin sammutusjärjestelmistä sekä muutamaan eri järjestelmään. Vaikka edellisessä kappaleessa veden todettiin olevan parhain palon sammutuksessa, niin tässä luvussa esitellään myös muita vaihtoehtoja.

5.1 Luokituslaitoksen säädöksiä

Akkuhuoneisiin on asennettava sammutusjärjestelmä, jonka sammutusaineena on joko vesi, hiilidioksidi tai muu vastaava sammutuskaasu. Mikäli järjestelmä käyttää vettä, sen tulee pystyä syöttämään makeaa sammutusvettä 30 minuutin ajan. Makeavesi otetaan järjestelmään sille suunnatuista makeavestitankeista tai muusta vastaavasta tankista, joissa on on matalan pinnanrajan hälytys. Järjestelmässä pitää olla mahdollisuus vaihtaa merivedelle, jonka vaihto hoituu automaattisesti tai manuaalisesti. Makean veden loputtua siitä on tultava hälytys komentosillalle. (DNV AS 2021, 32.)

Sammutusjärjestelmän sammutusaineen ollessa hiilidioksidia tai muuta kaasua, sen pitää olla sopiva palavien kaasujen sammutukseen. Järjestelmässä tulee olla itsenäinen toinen tilavuudeltaan samankokoinen kaasulaukaus, kuin ensimmäinen. Halogeenikaasuja käytettäessä tulee dokumentoida paineenvaihtelut sammutuksen lauetessa sekä varmistaa ovien ja palopeltien tiiveys. (DNV AS 2021, 32.)

5.2 HI-FOG-vesisumujärjestelmä

HI-FOG-vesisumujärjestelmä syöttää pumpun avulla järjestelmään korkealla paineella vettä, joka sprinklerin läpi mennessä synnyttää hienoa vesisumua. Korkealla paineella tuotettu vesisumu peittää isomman alueen verrattuna matalapaineiseen järjestelmään ja lisäksi vettä kuluu huomattavasti vähemmän. Vesisumu jäähdyttää tehokkaasti palavia pintoja, estää palon leviämisen sekä jäähdyttää kuumia ja myrkyllisiä palokaasuja. (Marioffin www-sivut 2022)

Järjestelmä koostuu putkistoista, suuttimista/sprinklereistä, alueventtiileistä sekä pumppu- ja painevaraajyksiköistä. Järjestelmän toiminta perustuu siihen, että putkistossa on koko ajan tietty paine (25 bar), joka luodaan pumpun ja painevaraajan avulla. Kun sprinklerissä oleva ampulli rikkoutuu tai järjestelmä kytketään manuaalisesti päälle alueventtiili huomaa paineen laskun putkistossa, jolloin se lähettää pumpulle käskyn käynnistyä tuottaen putkistoon jopa 140 barin paineen. Kun palo on saatu sammutettua, voidaan alueventtiili sulkea, jolloin pumppu pysähtyy automaattisesti luoden paineen putkistoon. (Marioff 2020)

Laivan akkuhuoneen järjestelmäksi ehkäpä parhaiten sopii aluelaukaisujärjestelmä, jossa kyseinen huone on rajattu omaksi järjestelmäksi. Kyseisessä järjestelmässä putkistot ovat kuivia sekä sprinklereiden tilalla on avosuuttimet (kuvassa 9). Järjestelmä kytkeytyy päälle automaattisesti palonilmaisimien avulla tai se voidaan laukaista manuaalisesti. Järjestelmän käynnistyessä pumppu alkaa tuottamaan painetta putkistoon. Samalla kyseisen akkuhuoneen alueventtiili avautuu, jolloin vesi alkaa suihkuamaan suuttimesta. Pumppu syöttää vettä niin kauan putkistoon, kunnes se sammutetaan manuaalisesti. (Marioffin www-sivut 2022)



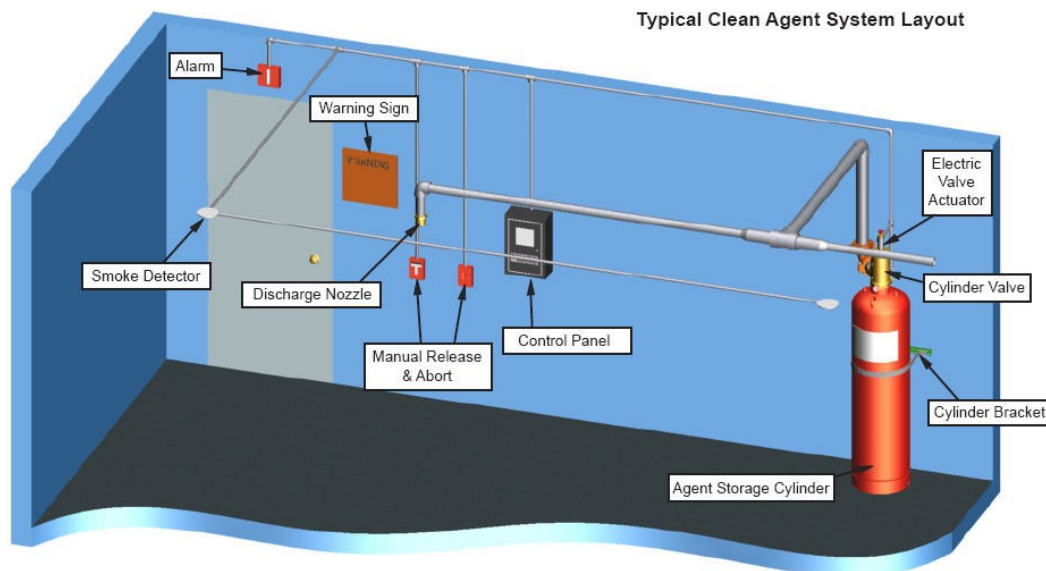
Kuva 9. Avosuutin HI-FOG-järjestelmässä. (Marioff)

5.3 Novec 1230

Novec 1230 on 3M kehittämä sammutusaine, joka on fluoriketonikaasua. Sitä säilytetään nestemäisenä pulloissa, mutta laukaistaessa se muuttuu kaasuksi. Suurimpina etuina siinä on sen nopea toimiminen laukaistaessa, jolloin se on heti palavassa tilassa sitomassa itseensä palosta aiheutuvaa lämpöä. Toiseksi se on vaaraton esimerkiksi elektroniikalle verrattuna veteen, joka todennäköisesti vahingoittaisi niitä. Lisäksi Novec 1230 ei kuulu fluorivetyihin, kuten jotkut sammutinkaasut, joiden käyttöä ollaan rajaamassa. (3M www-sivut 2022)

Järjestelmä koostuu putkistosta, suuttimista, säilytyspulloista, savun- ja palonilmaisimesta, manuaalisesta laukaisimesta sekä valo- ja äänihälyttimestä. Savunilmaisimen havaitessa savua se sulkee huoneen ilmanvaihdon. Tämän jälkeen palonilmaisimen havaitessa palon se sulkee tilaan menevät ovet sekä antaa ääni- ja valomerkin kaasun laukaisemisesta. Sitten järjestelmä avaa säilytyspulloissa olevat venttiilit, jolloin kaasu alkaa purkautumaan suuttimista tilaan. Kun kaasua on virrannut hetken huoneeseen,

avautuu paineentasausluukut, jotta tilaan ei synny ylipainetta. Lopuksi palon sammuttua ilmanvaihto aukeaa tilan tuulettamista varten. Kuvassa 10 on esimerkki Novec 1230 järjestelmästä. (3M Benelux 2017)



Kuva 10. Esimerkki Novec 1230 järjestelmästä. (Gielle Industries)

5.4 Vaahtojärjestelmä

Vaahtoa pidetään hyvänä vaihtoehtona sammutuksessa sen jäähdytysominaisuuden takia. Kun vaahtoavaa ainetta pumpataan veden sekaan, se muuttuu vaahdoksi. Järjestelmään kuuluu vaahdon tankki, vaahdon pumppu, annostelija sekä normaali palolinjasto, eli palopumppu, putkistot sekä suuttimet. (Marinesite www-sivut 2022)

Tulipalon sattuessa palopumppu käynnistetään, jolloin vesi muodostaa paineen putkistoihin. Tämän jälkeen käynnistetään vaahtopumppu, joka alkaa imemään vaahtoavaa ainetta tankista. Pumpun jälkeen aine siirtyy annostelijaan, jolla annostellaan aineen ja veden suhde oikeaksi, jotta saadaan oikea koostumus vaahtoa. Kun palo on saatu sammutettua, linjastot huuhdellaan lopuksi pelkällä vedellä, jotta niihin ei jäisi vaahtoa. (Marinesite www-sivut 2022)

5.5 F-500 sammuttimet

F-500 on sammutusaine, jota käytetään erikokoisissa käsisammuttimissa, jonkalaisia löytyy kuvasta 11. Sammutusaine sekoitetaan veden kanssa, jolloin se on tehokkaampi vaihtoehto jauhe- tai vaahtokäsisammuttimiin verrattuna. F-500 etuna on sen nopea ja tehokas tunkeutumiskyky, joten sen on helpompi päästä akun sisälle jäähdyttämään kennoja. Sen lisäksi se peittää ja imee itseensä palavia kaasuja, joka taas estää myrkykaasujen leviämisen. F-500 on myös fluoriton, joten se on ympäristön kannalta hyvä vaihtoehto. (YTM-Industrial www-sivut 2022)

Sammuttimia on saatavilla eri kokoja aina litran käsisammuttimesta jopa 50 litran pyörillä liikuteltavaan. Sammuttimissa oleva F-500 aineen pitoisuus on 2–30 % riippuen sammuttimen koosta, pienimmissä sen ollessa 2 %. Sammuttimen koko määrittelee, kuinka ison akun sammuttamista varten se on tehty. Kolmen litran sammutin on maksimissaan 1140 wattitunnin akkua varten, kun taas yhdeksän litran sammutin on 3420 wattitunnin akkua varten. (YTM-Industrial www-sivut 2022)



Kuva 11. Erikoisia F-500 sammuttimia (YTM-Industrial)

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä selvitys litiumakkujen käytöstä ja turvallisuudesta laivaympäristössä, sekä tehdä yhteenveto löytyneistä tutkimuksista ja lisätä omaa tietoisuutta asiasta. Mielestäni haluttuun lopputulokseen päästiin.

Uskon tulevaisuudessa akustojen käytön lisääntyvän laivaympäristössä, koska päästöttömyys ja ympäristöasiat ovat tällä hetkellä tärkeitä asioita merenkulussa. Uusiin rakennettaviin aluksiin tullaan asentamaan ainakin jonkinlainen energiaa talteen ottava akusto. Tämä luo hyötyjä, mutta samalla riskejä paloturvallisuuden kannalta.

Tätä työtä tehdessäni opin ja sain lisää tietoa litiumakuista ja niiden riskeistä. Aikaisemmin minulla ei ollut kovinkaan paljon kokemusta asiasta, mutta työtä tehdessäni koen oppineeni paljon. Uskonkin tämän työn olevan hyödyksi tulevaisuudessa omalla työuralla.

LÄHTEET

3M Benelux 2017. Animation 3M™ Novec™ 1230. Viitattu 11.10.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=1HmUpnzYv58>

3M: n www-sivut 2022. Viitattu 11.10.2022. <https://www.3msuomi.fi/>

Bhattacharjee S. 2021. 20 Points To Consider For Handling and Taking Care of Batteries On Ships. Viitattu 18.10.2021. <https://www.marineinsight.com/>

Blanco, S. 2021. Tesla Fire in Texas Crash Was Not How It Was Reported, Says Fire Chief. Viitattu 14.9.2022. <https://www.caranddriver.com/>

Color Line www-sivut 2021. Viitattu 6.10.2021. <https://www.colorline.com/>

Considerations for ESS Fire Safety. 2017. Consolidated Edison (ConEd). Viitattu 13.9.2022. <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Project/Nyserda/files/Publications/Research/Energy-Storage/20170118-ConEd-NYSERDA-Battery-Testing-Report.pdf>

Greencycle www-sivut 2021. Viitattu 5.10.2021. <https://www.greencycle.fi/>

Marinesite www-sivut 2022. Viitattu 13.10.2022. <https://www.marinesite.info>

Marioff 2020. HI-FOG Water Mist Fire Protection for Ships - Full Animation. Viitattu 11.10.2022. <https://www.youtube.com/watch?v=DTQPn7IovaY>

Marioffin www-sivut 2022. Viitattu 11.10.2022. <https://www.marioff.com/>

RULES FOR CLASSIFICATION – Ships. Part 6 Additional class notations. Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems. 2021. DNV AS. Viitattu 14.10.2021. <https://rules.dnv.com/docs/pdf/DNV/RU-SHIP/2021-07/DNV-RU-SHIP-Pt6Ch2.pdf>

STUDY ON ELECTRICAL ENERGY STORAGE FOR SHIPS. 2020. European Maritime Safety Agency (EMSA). Viitattu 4.10.2021. <http://www.emsa.europa.eu/publications/reports/download/6186/3895/23.html>

Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. 2019. DNV GL AS ja sidosryhmät. Viitattu 12.9.2022. <https://www.dnv.com/Publications/technical-reference-for-li-ion-battery-explosion-risk-and-fire-suppression-165062>

Youd, F. 2021. Will battery-powered ships take over the industry? Viitattu 28.9.2021. <https://www.ship-technology.com/>

YTM-Industrial www-sivut 2022. Viitattu 13.10.2022. <https://www.ytm.fi>