

Tom Wallenius (1704466 MIKT17SP)

AJONEUVOJEN VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET LAIVAN PALOHENKI- LÖSTÖN NÄKÖKULMASTA

Opinnäytetyö
Merenkulun koulutus

2020



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Tom Wallenius	Merenkulun insinööri	Huhtikuu 2020
Opinnäytetyön nimi		50 sivua
Ajoneuvojen vaihtoehtoiset polttoaineet laivan palohenkilöstön näkökulmasta		
Toimeksiantaja		
Finnlines Oyj, Carolus Ramsay		
Ohjaaja		
Joel Paananen		
Tiivistelmä		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia sähkö- ja kaasuautojen paloturvallisuutta ja sammutusmenetelmiä aluksen palohenkilöstön näkökulmasta. Aihevalintaan vaikuttivat toimeksiantajan tarpeet sekä omakohtainen kokemus paloturva-alalta maapuolella.</p> <p>Sähkö- ja kaasukäyttöiset autot tulevat väistämättä yleistymään aluksilla ja varsinkin autolautoilla sekä matkustaja-aluksilla ne muodostavat täysin uudenlaisia paloturvallisuusriskejä. Kaasu- ja sähköautojen sammutuksesta tekee normaalia haastavampaa se, että esimerkiksi sähköauton litiumioniakut voivat syttyessään laukaista kemiallisen reaktion, jota kutsutaan myös nimellä terminen karkaaminen. Tämä tarkoittaa litiumioniakuilla sitä, että akku syttyy ja palaa hallitsemattomasti. Kaasuautoissa sitä vastoin huonokuntoiset tankit saattavat aiheuttaa räjähdysvaaran.</p> <p>Opinnäytetyössä keskityttiin pääasiassa aluksen palohenkilöstön konkreettisiin mahdollisuuksiin toimia sähkö- tai kaasuauton palotilanteessa. Tavoitteeksi työlle asetettiin tiedonhankinta akku- ja kaasupalojen riskeistä, mahdolliset sammutus- ja palorajausmenetelmät sekä palohenkilöstön toimintaa palotilanteessa tukeva tutkimus.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä käytettiin pääosin kvalitatiivista eli laadullista tutkimusmenetelmää. Menetelmää voidaan kutsua myös kartoittavaksi tutkimukseksi eli kenttä- ja tapaustutkimukseksi.</p> <p>Tutkimustuloksena voidaan pitää tässä tutkimuksessa toteamusta, että sähkö- ja kaasuautojen sammutukseen, varsinkin aluksilla, ei ole vielä kehitetty toimivaa ja yksiselitteistä ratkaisua. Siitä huolimatta kehitys etenee lujaa vauhtia ja tulevaisuus näyttää, tuleeko painopiste olemaan akuston turvallisuuden vai sammutuskaluston kehityksessä.</p> <p>Tämän tutkimuksen hyödyt tulevat olemaan ongelmien kautta mahdollisten ratkaisujen löytyminen. Parhaassa tapauksessa tämä tutkimus parantaa alusten paloturvallisuutta ja tarjoaa opetusmateriaalia tulevaisuudelle.</p>		
Asiasanat		
Vaihtoehtoiset polttoaineet, paloturvallisuus, alukset, sammutusmenetelmät, palohenkilöstö		

Author (authors)	Degree	Time
Tom Wallenius	Bachelor of Engineering	April 2020
Thesis title		50 pages
Alternative vehicle fuels from the ship's fire brigade's point of view		
Commissioned by		
Finnlines Ltd, Carolus Ramsay		
Supervisor		
Joel Paananen		
Abstract		
<p>The purpose of this thesis was to examine the fire safety and extinguishing methods of alternative vehicle fuels' from the ship's fire brigade's point of view. The subject was chosen due to the commissioner's needs and the author's experience in the field of fire safety.</p> <p>Electric and gas cars will inevitable become more common in ships, especially in car ferries and passenger ships, and they will bring completely new fire safety issues to the ship. The extinguishing of electric or gas cars are much more difficult because, for example, the li-ion battery may trigger a chemical reaction known as thermal runaway. This means that the li-ion battery ignites and burns uncontrollably. On the other hand, malfunctioning tanks on gas vehicles can cause an explosion hazard.</p> <p>This thesis concentrates mainly on defining ways for the ships' fire personnel's to function in the event of electric or gas car fires. The objectives in this thesis were to acquire knowledge of the risks of electric and gas car fires, explore the extinguishing and fire limiting methods and to gather supportive information for promoting fire personnel's optimal operating mode. This thesis was made by using qualitative data collection method.</p> <p>As a result of this study, it can be stated that no functioning, unambiguous solution has yet been developed for the extinguishing of electric and gas cars, especially on a ship. Nonetheless, solutions are being developed at a fast pace, and the future will show whether the focus will be on improving battery safety or extinguishing equipment.</p> <p>The benefits of this study are based on the concept of finding possible solutions through problems. Moreover, this research may help improve the fire safety of ships and provide educational material for the future.</p>		
Keywords		
Alternative fuels, fire-safety, ships, extinguish methods, fire personnel		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET	7
3	AJONEUVOJEN VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET	8
4	SÄHKÖ JA KAASU AUTOJEN POLTTOAINEENA	8
5	SÄHKÖAUTON JA HYBRIDIN AKUSTON SIJOITUS, RAKENNE JA TOIMINTA.....	11
6	KAASUAUTON KAASUSÄILIÖN SIJOITUS, RAKENNE JA TOIMINTA	14
7	AUTOKANNEN PALOTURVALLISUUS	16
8	ALUKSEN PALOHENKILÖSTÖN RAKENNE JA TOIMINTA	17
9	SÄHKÖ- JA KAASUAUTOJEN PALOTURVALLISUUSRISKIT ALUKSELLA	17
10	MÄÄRÄYKSET VAIHTOEHTOISIA POLTTOAINEITA KÄYTTÄVISTÄ AJONEUVOISTA LASTINA	18
11	TUKESIN OHJEET VAHINGOITTUNEIDEN AKKUJEN KÄSITTELYYN	21
12	TUKESIN OHJEET LÄMPÖKARKAAMISEPÄILLYN AKUN KÄSITTELYYN	22
13	SÄHKÖAUTON JA HYBRIDIN AKUSTON PALO.....	23
13.1	Syttyminen.....	23
13.2	Palamistapahtuma	24
13.3	Sammutus	25
13.3.1	Tukahduttaminen	26
13.3.2	Vesisammutus	27
13.3.3	Sammutuskontti	27
13.4	Rajoittaminen.....	29
13.5	Jäähdyttäminen	30
14	KAASUAUTON KAASUSÄILIÖN PALO	32
14.1	Syttyminen.....	32
14.2	Palamistapahtuma	32
14.3	Sammutus	33
14.4	Rajoittaminen.....	34

15	USA:N PALONTORJUNTALIITON NFPA:N VUONNA 2013 PÄÄTTYNYT TUTKIMUSPROJEKTI SÄHKÖAUTON SAMMUTUKSESTA.....	34
15.1	Tutkimuksen toteutus.....	34
15.2	Tutkimuksen tulokset ja sammuttajien haastattelut.....	36
16	ALUKSEN PALOHENKILÖSTÖN TOIMINTA SÄHKÖ- JA KAASUAUTOJEN PALOTILANTEESSA.....	37
16.1	Ennaltaehkäisy	37
16.2	Palo- ja kaasuilmoitinlaitteisto.....	38
16.3	Palonsammutusmenetelmät	39
17	JOHTOPÄÄTÖKSET	40
18	POHDINTA.....	40
	LÄHTEET.....	44
	KUVALÄHTEET	49

1 JOHDANTO

Sähkö- ja kaasukäyttöiset ajoneuvot tulevat väistämättä yleistymään laivoilla, ja varsinkin autolautoilla sekä matkustaja-aluksilla ne muodostavat täysin uudenlaisia paloturvallisuusriskejä.

Tammi-syyskuussa 2019 ensirekisteröitiin 1 576 täyssähköautoa, 1 364 kaasuautoa ja 3 559 ladattavaa hybridiä. Vuonna 2018 vastaavana ajankohtana ensirekisteröitiin 541 täyssähköautoa, 1 118 kaasuautoa ja 3 953 ladattavaa hybridiä. (Liikennefakta 2019.)

Ongelmana sähkö- ja kaasuautoissa on syttyneen akun tai kaasusäiliön hyvin haastavat sammutusmahdollisuudet, tai jopa räjähdysvaara. Esimerkiksi sähköauton akuston syttyminen saattaa käynnistää kemiallisen reaktion, jota voidaan kutsua myös nimellä terminen karkaaminen. Termisellä karkaamisella tarkoitetaan akun hallitsematonta syttymistä ja palamista, jota on miltei mahdoton nykyisillä välineillä sammuttaa tehokkaasti ja luotettavasti. Tällä hetkellä käytäntö sähköautojen sammuttamisen suhteen eri maissa tuntuu olevan joko antaa auton palaa loppuun hallitusti, tai upottaa se vettä täynnä olevaan siirtokonttiin.

Erittäin haastava sammuttaa, syttyy toistuvasti uudelleen ja aiheuttaa ympäristötuhoja. Sellainen on sähköauton litiumioniakun palo. Pelastusala, niin maakuin meripuolellakin, tarvitsee pikaisesti ohjeet sähkö-, hybridi- ja kaasuautojen luotettavaan ja tehokkaaseen sammuttamiseen. (Puranen 2019.) Pelastuslaitoksella ei ole vielä tarpeeksi tietoa toimintatavoista sähköauton sammuttamiseksi.

Kaasuautoissa on sitä vastoin esiintynyt huonokuntoisista tankeista johtuvia vuotoja, jotka pahimmillaan aiheuttavat räjähdysvaaran. Räjähdystapauksia on sattunut maailmalla jo useita. Räjähdysvaara johtuu kaasuautojen vanhelevasta autokannasta, huonokuntoisista tankeista ja vuositarkastusten laiminlyönnistä.

Vuoden 2015 keväällä linköpingiläinen Mikael Brinkby oli tankkaamassa yrityksensä omistamaa kaasukäyttöistä työautoa, kun yhtäkkiä auton takaosassa räjähti. Auton takaikkuna, takapuskuri sekä muita auton osia lensi ilmassa. (Mauno 2015.) Ruotsissa kaasuautojen räjähdykset ovat vielä yleisempiä kuin Suomessa, mikä johtuu Ruotsin vanhemmasta kaasuautokannasta.

Katsastusyritys Bilprovningenin edustajan Morgan Isacsonin mukaan kaasuauton vuotava tankki muodostaa suljetussa tilassa, esimerkiksi autotalissa, merkittävän räjähdysvaaran. Autotalliin yön aikana vuotanut kaasu voi räjähtää valokatkaisijan aiheuttamasta kipinästä ja aiheuttaa suurta vahinkoa. (Mauno 2015.) Ruotsissa kaasuautojen vanhempi autokanta on tuonut jo esille tarkastuksien laiminlyönnistä johtuvia vaaratilanteita.

Ruotsin autokorjaamoyhdistyksen Sveriges fordonsverkstäders föreningin toimitusjohtaja Bo Ericssonin mukaan tankkien tarkastukset tulisi suorittaa vähintään kerran vuodessa, mutta käytännössä tankkien tarkastuksia ei tehdä lainkaan. (Mauno 2015.) Kaasuautojen tankkien tarkastuksille ei ole kaikissa maissa selkeitä määräyksiä, tai niitä laiminlyödään, jolloin liikenteeseen pääsee huonokuntoisilla kaasutankeilla varustettuja kaasuautoja.

Tutkimusteni mukaan Suomessakaan kaasuautojen tarkastuksille ei ole asetettu yleisiä määräyksiä. Tarkastukset ovat omistajan harteilla tai mahdollisten muiden huoltojen ja vuosikatsastuksien varassa. Eli mitään takeita ei ole kaasuautojen tankkien vuosittaisista tarkastuksista.

Tämä opinnäytetyö tehtiin Finnlines Oyj:lle, tarkoituksena tutkia ja kehittää hätätilannevalmiutta sähkö- ja kaasuautojen paloturvallisuuteen liittyen. Opinnäytetyön yhteyshenkilönä toimi Carolus Ramsay.

2 OPINNÄYTETYÖN TARKOITUS JA TAVOITTEET

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia sähkö- ja kaasuautojen paloturvallisuutta ja sammutusmenetelmiä, aluksen palohenkilöstön näkökulmasta. Aihevalintaan vaikuttivat toimeksiantajan tarpeet sekä omakohtainen kokemus paloturva-alalta maapuolella.

Toimeksiantajan toiveena opinnäytetyötä suunniteltaessa olikin perehtyminen näihin asioihin käytännön paloturvallisuuden, sekä sammutus- ja palonrajausmenetelmien kautta. Minkälaisia konkreettisia mahdollisuuksia aluksen palohenkilökunnalla on toimia sähkö- ja kaasuautojen palotilanteessa. Tässä opinnäytetyössä pyrin nostamaan esille suurimmat ongelmat, sekä tuoda esille sitä kautta mahdollisia ratkaisuja. Yksi opinnäytetyö tuskin riittää ratkaisemaan koko ongelmaa, mutta se varmasti auttaa nostamaan esille keskeisiä asioita, sekä antamaan yhden näkökulman riskeihin sekä niiden minimoimiseen.

Tutkimus keskittyi pääosin sähkö- ja kaasuautojen paloturvallisuuteen, sekä konkreettisiin sammutustoimiin aluksilla. Maapuolella autojen vaihtoehtoisten polttoaineiden paloturvallisuutta sekä pelastushenkilöstön toimintaa koskevia tutkimuksia on tehty useita. Näitä tutkimuksia pystytään varmasti soveltamaan osin aluksillakin, mutta täysin laivaolosuhteisiin soveltuvia tutkimuksia oli tehty syksyllä 2019 vain yksi. Lauri Mäenpää Satakunnan-ammattikorkeakoulusta on tehnyt loppuvuodesta 2019 opinnäytetyön ”Sähkö-, hybridi- ja kaasukäyttöisten henkilöautojen paloturvallisuus matkustaja-autolautalla”.

3 AJONEUVOJEN VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET

Tällä hetkellä yleisimmät liikennekäytössä olevat vaihtoehtoiset polttoaineet ajoneuvoille ovat sähkö ja kaasu. Vuonna 2019 sähkö- ja kaasuautojen kysyntä kasvoi Suomessa 7,4 prosenttiin. (Liikennefakta 2019.) Euroopan unionin Suomelle asettaman päästövähennystavoitteen ansiosta päästökaupan ulkopuolisten kasvihuonepäästöjen tulee vähentyä 39 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. (Syke 2020). Tämä tulee vaikuttamaan vaihtoehtoisilla polttoaineilla kulkevien ajoneuvojen yleistymiseen tulevaisuudessa.

4 SÄHKÖ JA KAASU AUTOJEN POLTTOAINEENA

Sähköautoilla tarkoitetaan joko täyssähköautoja tai hybridejä. Täyssähköautojen käyttövoimana toimii pelkästään ulkoisesti ladattavat akut. Hybrideissä on polttomoottori, sekä ulkoisesti ladattavat akut. Sähköauto ei itsessään tuota kasvihuonepäästöjä, jos sähkö on tuotettu saasteettomasti. Sähköauto voidaan myös varustaa aurinkokennoilla, jolloin se tuottaa osan tarvitsemastaan

energiasta kennojen avulla. Tutkimusteni perusteella vielä tällä hetkellä sähköautojen polttoainekustannukset ovat vähäisempiä kuin bensiinikäyttöisten, mutta autojen ostohinta on korkeampi.

Täyssähkö- ja hybridi-autoissa on tähän asti käytetty pääosin nikkelimetallihybridiaakkuja, joissa elektrolyytinä käytetty kaliumhydroksidin vesiliuos ei syty palamaan. Nykyään uusiin sähköautoihin asennetaan litiumioniakustoja, jotka eivät kuitenkaan sisällä litiummetallia. Niissä käytettävä elektrolyytti sisältää litiumin suoloja, esimerkiksi litiumfluoridia orgaanisessa liuottimessa. Tämän kaltaisessa akussa syttymisen vaara on merkittävä, jos akun lämpötila nousee riittävästi yli sallitun käyttölämpötilan. Litiumioniakun palaessa muodostuu myrkyllisiä kaasuja, esimerkiksi fluorivetyä. (Pelastustieto 2016.)

Ottomootorilla varustettuja ajoneuvoja voidaan käyttää myös kaasumaisilla polttoaineilla. Jos kaasunjakelupisteitä on kattavasti käytössä, sen hinta on kilpailukykyinen muihin polttoaineisiin nähden, ja kaasun käyttö polttoaineena vähentää merkittävästi päästöjä, on sen käyttö peruteltua ja suositeltavaa. (Motiva 2019a.)

Metaani (CH₄) polttoaineena voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, biokaasuun ja maakaasuun. Biokaasua syntyy luonnossa lahoamisprosessissa, ja maakaasu muodostuu suurista esiintymistä maakerrosten alla. Näin ollen maakaasua kutsutaan fossiiliseksi maakaasuksi. Käsiteltyinä ja puhtaina biokaasu ja maakaasu ovat koostumukseltaan melko samanlaisia, jonka takia niitä voidaan käyttää samassa kaasunjakeluverkossa. Ajoneuvokäytössä metaani on tankissa noin 200 baarin paineessa. Tällöin puhutaan paineistetusta maakaasusta (CNG, Compressed Natural Gas) ja paineistetusta biokaasusta (Compressed Biogas, CBG). Maakaasua ja biokaasua voidaan käyttää myös nesteytettyinä (LNG, Liquefied Natural Gas ja LBG, Liquefied Biogas). Nestemäisinä käytettynä niiden lämpötilan tulee pysyä alle -162 °C. Nesteytettyä metaania käytetään pääosin laivoissa. LNG:tä käyttäviä hyötyajoneuvoja on jonkin verran, mutta suuren energiatiheyden haittapuolena ovat tankin korkeat eristysvaatimukset, mikä vaikeuttaa LNG:n liikennekäyttöä. (Motiva 2019b.)

Nestekaasu (Liquified Petroleum Gas, LPG) koostuu pääosin propaanista, (C_3H_8) tai propaanin ja butaanin (C_4H_{10}) seoksesta. Nestekaasua saadaan öljyjälöstuksessa sivutuotteena, joten se on fossiilinen polttoaine. Nestekaasun varastointi on huomattavasti paineistettua kaasua helpompaa ja turvallisempaa, tankin pienemmän paineen takia (10 baaria). Nestekaasua käytetään yleisesti grilleissä, asuntovaunuissa ja erilaisissa lämmittimissä. Nestekaasua voidaan käyttää myös aerosolituotteiden ponneaineena. (Motiva 2019b.)

Dimetyylieetteri, DME (C_2H_6O) on normaalissa ilmanpaineessa (atm) kaasumaisessa olomuodossa, mutta nesteytyy melko alhaisessa paineessa kuten nestekaasu. DME:tä voidaan valmistaa maakaasusta, hiilestä ja biomassasta sekä selluprosessin sivutuotteena syntyvästä mustalipeästä. Nestemäinen olomuoto mahdollistaa varastoinnin ja ruiskutuksen, joten se soveltuu hyvin polttoainekäyttöön dieselmootoreissa. Tavalliseen dieselmootoriin verrattuna DME:n käyttö vaatii kuitenkin muutoksia polttoainejärjestelmässä polttoaineen paineistetun varastoinnin sekä DME:n huonon voitelukyvyyn takia. (Motiva 2019b.)

Vetyä (H_2) voidaan käyttää tavallisessa polttomootorissa ja sähköä tuottavassa polttokennossa. Vetyä ei esiinny luonnossa, vaan sitä valmistetaan esimerkiksi vedestä ja hiilivedystä. Vedyn käyttö polttoaineena tuottaa pakokaasuina pääosin vesihöyryä, joten sen käyttö pienentäisi liikenteen päästöongelmia. Vedyn ongelmana liikennekäytössä on kuitenkin sähköön verrattuna sen suurempi energiankulutus. Vety valmistetaan elektrolyysillä ja paineistetaan, sekä varastoidaan tai syötetään jakeluverkkoon ennen autoon tankkausta. Ajoneuvokäytössä vedyn varastointipaine tankeissa on noin 700 baaria. Vety voidaan varastoida myös nestemäisenä, mutta lämpötilan tulee pysyä alle -253 °C . Jos vedyn valmistusprosessissa ei voida hyödyntää uusiutuvia energianlähteitä, kuten esimerkiksi tuulivoimaa, voi vedyn käyttö liikennepolttoaineena tuottaa merkittävästi enemmän hiilidioksidipäästöjä verrattuna sähköautoissa käytettävää valtakunnanverkosta ladattavaa sähköön. (Motiva 2019b.)

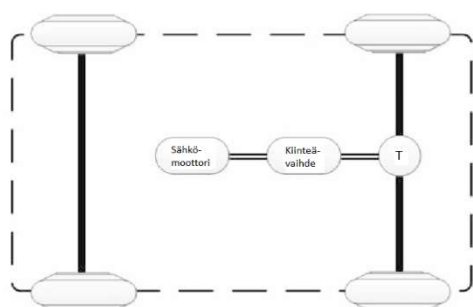
Kaasuautot eivät merkittävästi eroa rakenteeltaan bensiinikäyttöisistä ottomootori autoista. Kaasukäyttöisten autojen käyttövoima perustuu joko pelkäs-

tään kaasun palamiseen, tai mahdollisesti bi-fuel järjestelmään, joka hyödyntää sekä bensiiniä että kaasua. Kaasu palaa öljyä puhtaammin, jolloin se vähentää kasvihuonepäästöjä. Olemassa olevia bensiinikäyttöisiä autoja on mahdollista muuttaa kaasukäyttöisiksi. Tutkimusteni mukaan vielä tällä hetkellä maakaasun hinta on bensiiniä alhaisempi, mutta ajoneuvojen hinta korkeampi. (Motiva 2019a.)

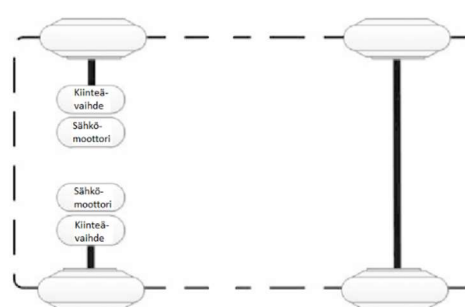
5 SÄHKÖAUTON JA HYBRIDIN AKUSTON SIJOITUS, RAKENNE JA TOIMINTA

Täyssähköauton tärkeimmät komponentit ovat akusto, sähkömoottori(t) ja ohjauselektronikka. Täyssähköauto voi olla varustettu joko yhdellä tai kahdella sähkömoottorilla. Hybrideissä on polttomoottorin lisäksi akusto, sähkömoottori, generaattori ja ohjauselektronikka. Sähköautoissa käyttöjännite on 400-600 V.

Esimerkiksi täyssähköauto Nissan Leafin akusto rakentuu 192 akkukennosta. Nämä 192 akkukennosta on kytketty 48 moduuliin, eli yksi moduuli koostuu neljästä akkukennosta, kun kaksi sarjaan kytkettyä kennoa on kytketty rinnan. Täten täyteen ladatun (4,1 V per kenno) akun jännitteeksi saadaan $2 \times 4,1V \times 48 = 393,6 V$. Tyhjän kennon jännite on noin 3 voltia, jolloin koko akuston jännite on vajaa 300 voltia. (Luukkanen 2018.) Kuvassa 1 ja 2 esitetty sähkömoottorin mahdolliset sijainnit.



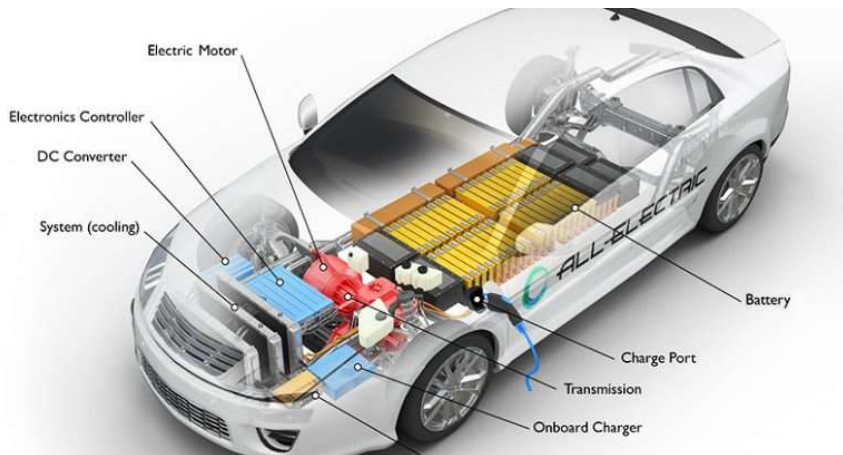
Kuva 1. Yksi sähkömoottori (Niskala 2017)



Kuva 2. Kaksi sähkömoottori (Niskala 2017)

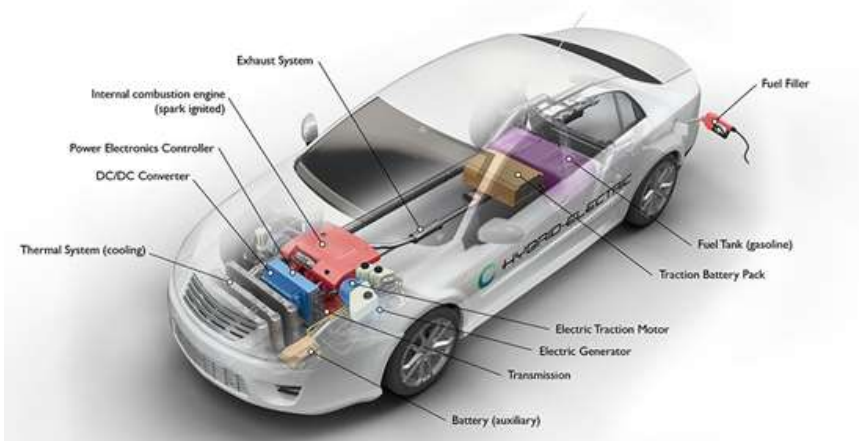
Täyssähköautoissa yleisin käytettävä akku tällä hetkellä on litiumioniakku. Litiumioniakuilla on suuri energiatiheys, jonka takia niitä käytetään pääosin käyttökohteissa, joissa akulta vaaditaan paljon energiaa suhteessa tilavuuteen ja painoon. (Tukes 2019.) Täyssähköautoissa akusto on yleensä sijoitettuna auton pohjaan, ja määrällään se kattaa valtaosan tilasta (kuva 3). Tämä sijoittelu

parantaa myös osaltaan auton ajettavuutta laskemalla painopisteen mahdollisimman alas, joten valmistajat suosivat sitä merkistä riippumatta. Toisaalta kyseinen sijoittelu altistaa akut kaikille mahdollisista pohjakosketuksista aiheutuille kolhuille, mikä pahimmillaan voi aiheuttaa vaaratilanteita, tai jopa akkupalon. Akuston sijoittaminen koteloituna auton pohjaan vaikeuttaa myös huomattavasti akkustopalon sammutustyötä palotilanteessa.



Kuva 3. Täyssähköauton akuston sijoitus (AFDC s.a.)

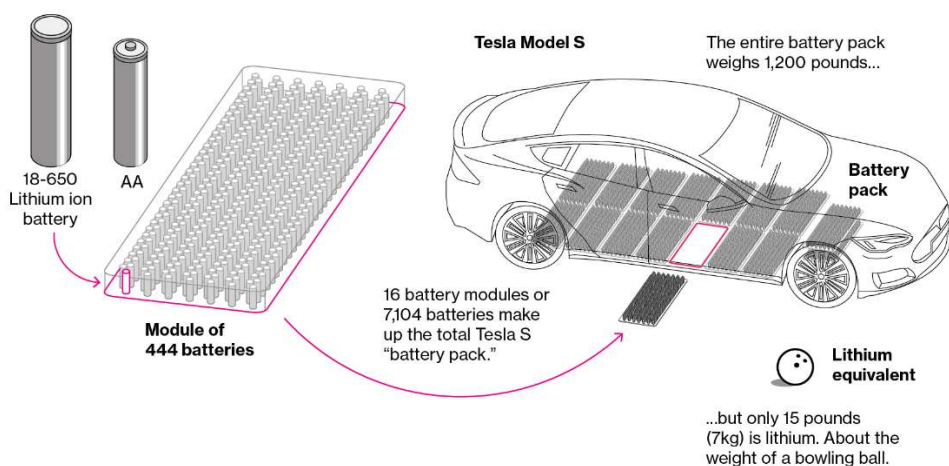
Hybrideissä akusto on usein sijoitettu auton takaosaan, polttoainetankin läheisyyteen, mikä jo sinällään vaarantaa osaltaan paloturvallisuutta. Se myös mahdollistaa palon nopean leviämisen, tai jopa räjähdyksen palotilanteessa (kuva 4).



Kuva 4. Hybridin akuston sijoitus (AFCD s.a.)

Vastoin yleistä käsitystä täyssähköauton akusto rakentuu kennostoista AA-sormiparistoja muistuttavia litiumioni 18650 -akkuja. Samaa akkutyyppeä käytetään esimerkiksi kannettavien tietokoneiden, taskulamppujen ja sähkötupa-

kan akuissa. (Pyyny 2019.) Näitä paristoakkuja voi olla yhdessä täyssähköauton akkumoduulissa useampi sata. Alla olevan Tesla Model S:n pohjasta näistä moduuleita löytyy 16 kappaletta, jolloin litiumioniakkuparistoja voi olla yhdessä sähköautossa yli 7000 kappaletta (kuva 5 ja kuva 6).

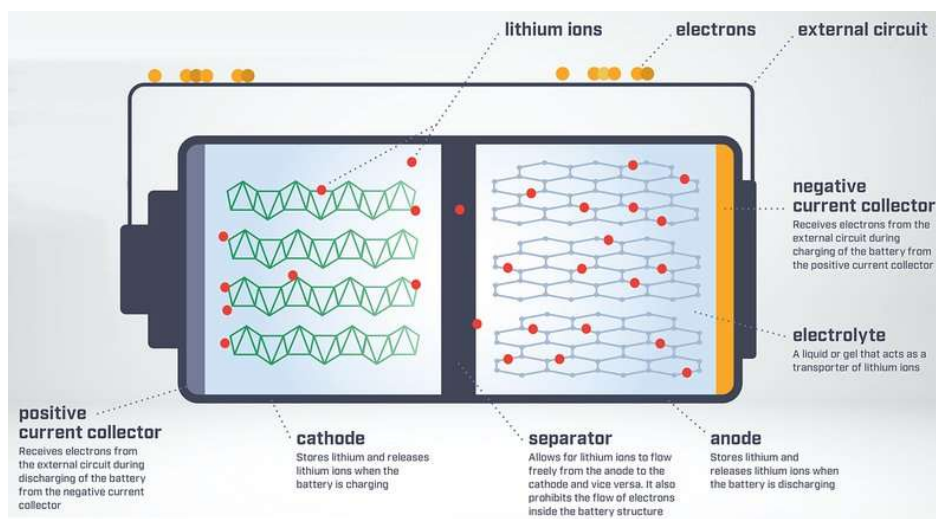


Kuva 5. Tesla Model S -akuston ja akkumoduulin rakenne (Krishna 2017)



Kuva 6. Täyssähköauton akusto (Luukkanen 2019)

Litiumioniakun pääkomponentit ovat positiivinen elektrodi, negatiivinen elektrodi ja elektrolyytti. Positiivinen elektrodi eli katodi, on valmistettu yleensä hiilestä. Negatiivinen elektrodi eli anodi, on metallioksidi. Elektrolyytinä toimii litiumsuola orgaanisessa liuoksessa (kuva 7).



Kuva 7. Litiumioniakun rakenne (Allen 2019)

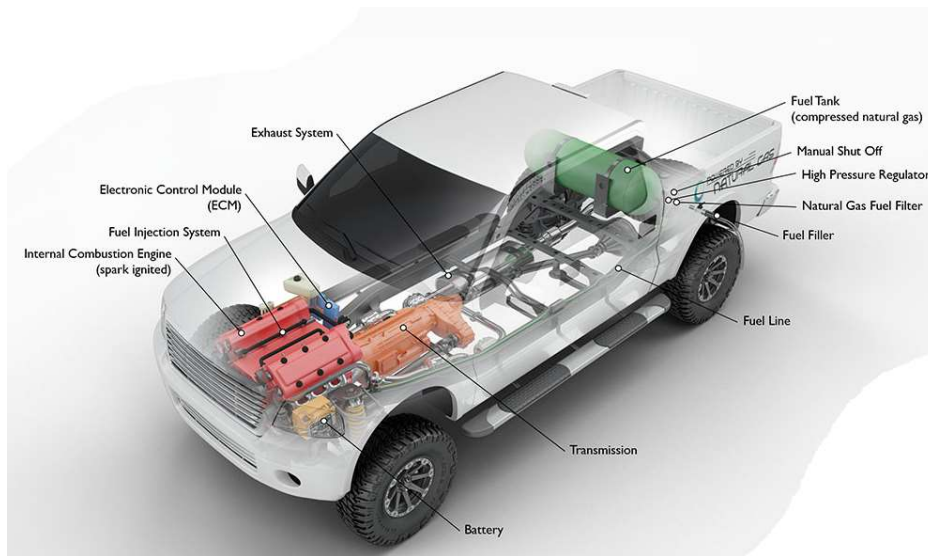
Kun akkua ladataan, katodipuolen elektronit alkavat liikkua kohti anodipuolta ulkoisen virtapiirin kautta. Elektronit pois luettuina litiumatomit ovat positiivisesti latautuneita litiumioneja. Nämä ionit liikkuvat elektrolyytin läpi kohti anodia. Kun anodipuoli on täynnä, akku on täysin latautunut. Erottimen tarkoitus on estää litiumin kulkeutuminen anodin ja katodin välillä, kuitenkin päästäen litiumionit läpi. Akun purkautuessa litiumionit liikkuvat elektrolyytin läpi takaisin katodipuolelle, ja elektronit liikkuvat katodipuolelle ulkoisen virtapiirin kautta, tuottaen sähköauton moottorille sähköä. Vikaantuessaan, tai erottimen rikkoutuessa, elektrodit menevät keskenään oikosulkuun, mikä nostaa kennon lämpötilan nopeasti erittäin suureksi. Tällöin katodimateriaalina käytetystä metallioksidista vapautuu happea, ja akku voi syttyä palamaan. (Puranen 2017.)

Ajoneuvokäytössä litiumioniakut vaativat valvonnan ja kennojen varausta tarvittaessa tasaavan elektroniikan, eli BMS:n (Battery Management System). BMS on elektroninen akunhallintajärjestelmä, joka hallitsee ladattavaa akustoa pitämällä sen turvallisen käyttöalueen sisällä valvomalla akuston tilaa. (Electropaedia s.a.)

6 KAASUAUTON KAASUSÄILIÖN SIJOITUS, RAKENNE JA TOIMINTA

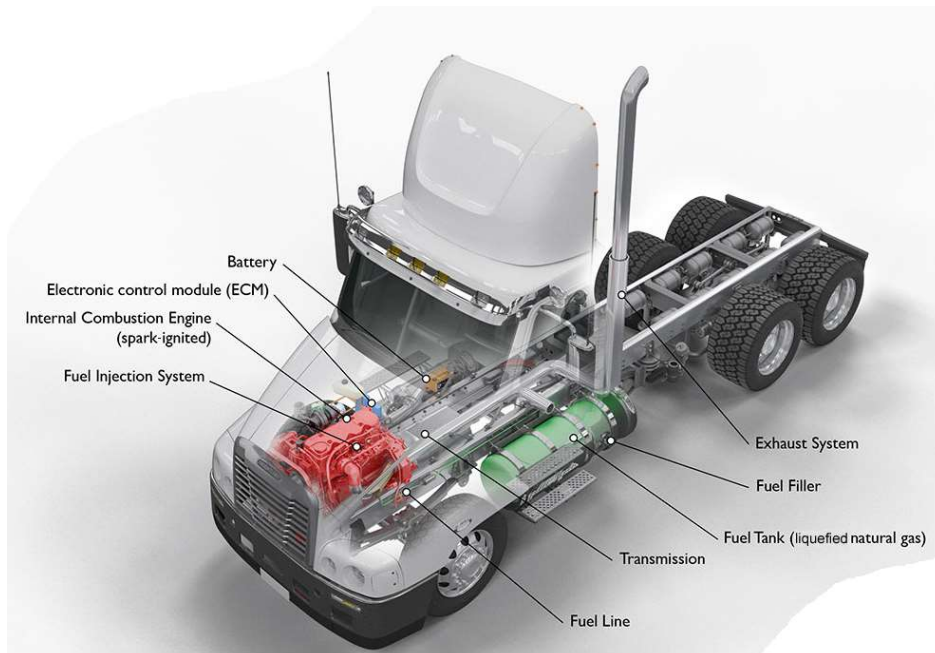
Kaasuautojen moottori käyttää samaa periaatetta kuin ottomoottoriautojen moottorit. Polttoaineena käytetään joko kaasua tai bensiiniä. Kaasuautoissa kaasutankki on sijoitettu yleensä auton peräosaan samalla tavalla kuin bensiinikäyttöisissä autoissa. Vastaavasti bensiinikäyttöisestä autosta muunnellun

kaasuauton tankki käyttää hyväkseen vanhaa bensiinitankkia. Bi-fuel-autoissa molemmat tankit on sijoitettu auton takaosaan (kuva 8).

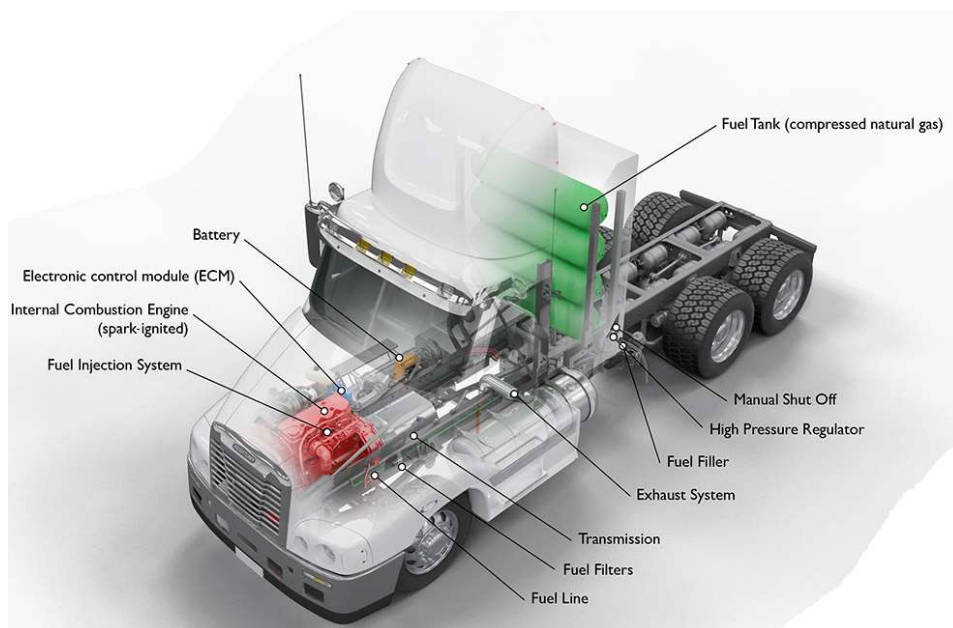


Kuva 8. CNG-säiliön sijoitus (AFDC s.a.)

Ajoneuvoyhdistelmissä kaasusäiliöt ovat sijoitettuna joko vetoajoneuvon kylkiin tai takaosaan (kuva 9 ja 10).



Kuva 9. Raskaan kaluston LNG-säiliön sijoitus (AFDC s.a.)



Kuva 10. Raskaan kaluston CNG-säiliön sijoitus (AFDC s.a.)

7 AUTOKANNEN PALOTURVALLISUUS

Matkustaja-aluksen autokansi kattaa merkittävän osuuden aluksen mahdollisista paloturvariskeistä suuren ja herkästi itsestään syttyvän palokuorman vuoksi. Sähkö- tai kaasuauton syttymiseen ja sitä kautta akuston tai kaasusäiliön syttymiseen voi johtaa myös ulkopuoliset tekijät. Ajoneuvojen öljyvuodot, kylmäkuljetusten aggregaatit, henkilöautojen ja rekkojen sähköviat, akustoviat, kuljetuskonttien tuntematon sisältö sekä pakokaasut ja lämpötila muodostavat otolliset olosuhteet palon syttymiselle. Alusten autokannet ovat yleensä suuria ja avoimia tiloja, joissa palo-osastoinnit ovat haasteellisia toteuttaa. Täyteen kuormaan lastattuina ne ovat äärimmäisen ahtaita ja vaikea kulkuisia.

IMO:n SOLASin FSS-koodi määrää aluksilla autokansien paloilmoitin ja -hälytysjärjestelyt, resoluution A.830(19) (Code on alarms and indicators) ja lippuvaltioiden viranomaisten päätösten perusteella. IMO:n SOLAS-turvamääräyksissä asetetun Fire safety systems -koodin mukaan (IMO 2015) matkustaja-alusten ja autolauttojen autokansilla tulee olla kiinteä palonilmoitin- ja palohälytysjärjestelmä sekä palonilmaisimien tulee olla lämpö-, savu- tai liekkitoimisia. Myös muut ilmaisintyytit ovat mahdollisia lippuvaltion viranomaisen mukaan, mikäli ne ovat vähintään yhtä herkkätoimisia kuin edellä mainitut. SOLAS-säädösten mukaan (IMO 2020) lippuvaltion viranomaisen päättää viimekädessä siitä, minkälaiset palonilmaisimet ja millä etäisyyksillä toisistaan ne autokannella tulee olla. Manuaaliset hälytyspainikkeet tulee asettaa siten, että

mistään kohdasta autokantta ei ole yli 20 m matkaa hälytyspainikkeelle (IMO 2015). Autokansille tulee järjestää myös jatkuvaa ja tehokasta palovartiointia (Onnettomuustutkintakeskus 2007).

8 ALUKSEN PALOHENKILÖSTÖN RAKENNE JA TOIMINTA

Aluksen palontorjunta merellä on pääasiallisesti siihen varta vasten koulutetun henkilökunnan ja sammutuslaitteistojen varassa. Aluksen miehistöllä sekä päällystöllä tulee olla voimassa vaadittavat STCW-koulutukset, jotka uusitaan viiden vuoden välein. Palohenkilöstö koostuu STCW-palokoulutuksen saaneista kone- ja kansihenkilökunnasta. Päivystäviä paloryhmiä matkustaja-aluksilla on yleensä kaksi, joilla molemmilla on oma tehtävänsä palon sattuessa. Paloryhmä koostuu paloryhmän johtajasta sekä sammutuspareista. Konepääällikkö toimii operaation palopääällikkönä ja johtaa ryhmien toimintaa.

Aluksen päällystön sekä miehistön pakollisen palokoulutuksen sekä hätätilanteiden peruskoulutuksen vaatimukset ovat kansainvälisesti määritelty STCW-yleissopimuksessa (IMO 2010). Kansi- ja konepäällystöltä vaaditaan lisäksi erillinen STCW-yleissopimuksessa (IMO 2010) määritelty päällystön palokoulutus, joka antaa valmiudet toimia sammutusryhmien johtotehtävissä. Aluksella tulee järjestää palokoulutusta ylläpitäviä paloharjoituksia, joiden sisältö on SOLAS-yleissopimuksessa määritelty. Matkustaja-aluksilla harjoituksia tulee pitää kerran viikossa ja lastialuksilla kerran kuukaudessa. Harjoituksista on pidettävä kirjaa, jotta niiden sisältö voidaan tarvittaessa tarkastaa. (Onnettomuustutkintakeskus 2007.)

9 SÄHKÖ- JA KAASUAUTOJEN PALOTURVALLISUUSRISKIT ALUKSELLA

Sähköautoissa ja hybrideissä suurimman paloturvallisuusriskin aiheuttaa syystä tai toisesta tapahtuva litiumioniakuston liiallinen lämpeneminen. Kun akusto vioittuu tai sen latauksessa matkan aikana tapahtuu jokin toimintahäiriö, liiallisen lämpenemisen riski kasvaa ja itsestään syttymisen vaara on merkittävä. Koska IMO ei ole ohjeistanut varustamoita sähköajoneuvojen latauksesta mitenkään, on päätös ajoneuvojen latauksesta varustamoilla itsellään. (Mykkänen 2016.)

Sähköautovalmistaja Teslan mukaan sähköauton syttyminen on 10 kertaa epätodennäköisempää kuin polttomoottoriauton. (Keränen 2019). Teslan vakuutteluista huolimatta Suomessa ja maailmalla on törmätty jo useisiin tapauksiin, jossa sähköautoja on syttynyt tuleen itsestään akkumoduulien vikaantumisessa.

Toisaalta Ruotsin varustamoyhdistyksen (Svensk Sjöfart, Swedish Shipowners' Association) alkuvuodesta 2020 tekemän raportin mukaan sähköautojen lataaminen ei nosta sähköautojen paloturvariskiä aluksella merkittävästi. Jos tarkastellaan esimerkiksi Teslan vuoteen 2018 mennessä valmistamia, noin 300 000–350 000 sähköautoa, joista 21 on syttynyt palamaan, ei sähköauton syttyminen todellakaan ole sen todennäköisempää kuin polttomoottoriauton. Tällä hetkellä tiedetään ainoastaan yksi tapaus, jossa sähköauto on syttynyt latauksen yhteydessä aluksella. Tämä tapahtui vuonna 2010 Pearl of Scandinavia aluksella ja johtui kotitekoisesta latauskaapelista. Palo saatiin sammutettua välittömästi. Tutkimuksessa todettiin, että valtaosa sähköautojen paloista yleisesti lataamisen yhteydessä johtuu latauspisteen tai auton sähköjärjestelmän vikaantumisesta, eikä akuston vikaantumisesta. Tosin sähköautokannan kasvaessa myös riskit tulevat kasvamaan. Tulevaisuudessa raskaan kaluston lataaminen aluksilla todennäköisesti kielletään akuston koon vuoksi, toisin kun henkilöautojen. Raportin mukaan vuosina 2010–2019 sähköauton paloja maailman laajuisesti on tullut tietoon 28 kappaletta, ja yksi niistä on tapahtunut aluksella. (Carlsson 2020.)

10 MÄÄRÄYKSET VAIHTOEHTOISIA POLTTOAINEITA KÄYTTÄVISTÄ AJONEUVOISTA LASTINA

IMO julkaisi heinäkuussa 2019 väliaikaisen ohjeen liittyen alusten ro-ro-tilojen tulipalon riskin vähentämiseen.

MSC.1/Circ.1615

VÄLIAIKAISET TOIMINTAOHJEET NYKYISTEN SEKÄ UUSIEN RO-RO MATKUSTAJA-ALUSTEN LASTITILOJEN ONNETTOMUUKSIEN, JA NIIDEN SEURAAMUSTEN PIENENTÄMISEKSI.

- 1 *Meriturvallisuuskomitea hyväksyi 101. istunnossaan (5.-14. Kesäkuuta 2019) väliaikaiset ohjeet uusien ja olemassa olevien ro-ro-matkustaja-alusten ro-ro-tiloissa ja erityistiloissa tapahtuvien tulipalojen ja niiden seurausten minimoimiseksi. Ohjeistuksen on laatinut SSE:n (Sub-Committee on Ship System and Equipment) alakomitea kuudennessa istunnossaan annex-liitteen mukaisesti.*
- 2 *Komitean hyväksymät ohjeet ovat sovellettavissa, huomioon ottaen käytännön kokemukset.*
- 3 *Jäsenvaltioita pyydetään saattamaan väliaikaiset ohjeet kaikkien asianomaisten osapuolten tietoon ja ilmoittamaan järjestölle kokemuksensa, joka on saatu näiden väliaikaisten suuntaviivojen käytöstä. (IMO 2019.)*

Luokituslaitoksilla voi olla tarkempia vaatimuksia liittyen sähköautojen ja vaihtoehtoista polttoainetta käyttävien autojen paloturvallisuuteen ja latausjärjestelyihin. Esimerkiksi DNV-GL:n luokittamilta aluksilta, joiden paloturvallisuutta on parannettu yli normaalien vaatimuksien (luokkamerkintä F), edellytetään oikein lainauksen mukaisia järjestelyjä:

5.5.21.2 Vaihtoehtoisia polttoaineita käyttävät ajoneuvot

Sähköajoneuvojen ja vaihtoehtoisilla polttoaineilla, kuten kaasulla (paineistetut ja nestemäiset), metanoli / etanoli ja vety, kulkevien ajoneuvojen sijoittamista ja tulipaloja koskeva suunnitelma on oltava saatavilla. Vetyajoneuvot on sijoitettava omiin osastoihin, tai muihin turvallisiin paikkoihin, joissa vetypalon vaikutus on minimoitu. Muille ajoneuvoille (sähköajoneuvot ja muut vaihtoehtoiset polttoaineet kuin vety) ei ole erityisiä vaatimuksia, mutta on suositeltavaa, että sähköajoneuvoja pidetään paikoissa, joissa muiden autojen ja lastin tulipalot ovat minimoituja.

- 1 *Yhtä latauspistettä kohden käytettävissä oleva teho tulee olla enintään 5 kW. Lataus suuremmalla teholla, mukaan lukien pikalataukset, vaativat erityistoimenpiteitä.*

- II Tällaisia latauspisteitä palvelevia virtalähdepiirejä on tarkkailtava oikosulkujen / maavikojen varalta, ja niistä on tultava hälytys jatkuvasti miehitettyyn valvomoon. Keinot näiden piirien eristämiseksi on oltava helposti miehistön käytettävissä ja selvästi merkittynä.*
- III Latauspisteen ohjeet turvalliseen käyttöön on oltava saatavilla. Miehistö valvoo laturien kytkemistä.*
- IV Latauksen on tapahduttava alueella, jolla muissa yksiköissä tapahtuvan tulipalon, sekä lataamisesta alkavan tulipalon vaikutukset on minimoitu. Hyväksyttävä ratkaisu on A60 suojattu alue, sen alueen ylä- ja alapuolella, jossa laturit ovat saatavilla.*
- V Latausjärjestelmän suunnittelun tulisi perustua standardiin IEC 61851-1 , Sähköä johtava ajoneuvo latausjärjestelmä, yleiset vaatimukset. (DNV-GL 2019.)*

Yllä olevat vaatimukset eivät ole kaikille DNV-GL:n ro-pax-aluksille, vaan juuri niille aluksille, joiden autokansien paloturvallisuutta on lisätty. Alkuperäinen DNV-GL-dokumentti löytyy heidän nettisivultaan kohdasta: Rules for classification/ Ships/ Part 6 Additional class notations.

2010-luvulla Euroopassa tapahtui useita vakavia tulipaloja ro-ro-alusten autokansilla, kuten Lisco Gloria v. 2010, Norma Atlantica v. 2014 ja Sorrento v. 2015. Tulipalojen seurauksena Euroopan Meriturvallisuusvirasto (EMSA) aloitti vuonna 2015 Fire Safe projektin, jossa käydään läpi ehdotuksia ro-ro alusten autokansien paloturvallisuuden parantamiseksi. Yhtenä osa-alueena projektissa oli sähköautojen lataamisesta aiheuttavan riskin pienentäminen. Fire Safe 1 ja 2 tutkimuksien loppuraportit löytyvät Euroopan meriturvallisuusviraston kotisivuilta.

Syksyllä 2019 alkoi EU rahoittama LASH Fire projekti, joka liittyy myös ro-ro-alusten paloturvallisuuteen.

Yksityisen sektorin tekemistä esimerkkinä Standard Club'in ohje ' A master's guide to fire safety on ferries'. Standard Club on varustamojen omistama, meripuolen vakuutuksiin ja riskien hallintaan erikoistunut yhdistys.

SOLAS on täydentynyt viime vuosina useista lisäyksistä, joiden tarkoituksena on parantaa ro-ro-alusten turvallisuutta. Tammikuussa 2016 voimaan tullut laki määrää uusien vaihtoehtoisia polttoaineita käyttäviä autoja lastina kuljettavien alusten noudattavan SOLAS Ch. II-2 Reg. 20-1 asetettuja määräyksiä. Jo olemassa olevat alukset noudattavat IMO MSC.1/Circ.1471 määräyksiä.

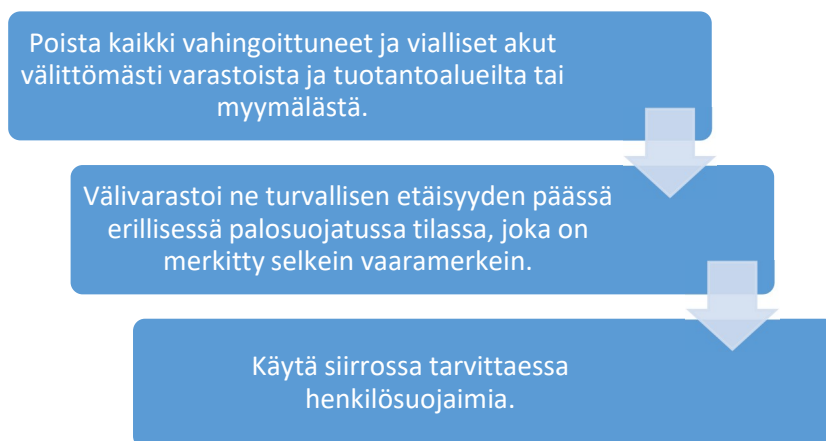
Autolauttojen ja rahtialusten, joilla on irtolastina sähkökäyttöisten ajoneuvojen akkuja, tulee noudattaa IMO Code for Dangerous Goods SP 961 ja 962 asetettuja määräyksiä. Pääpiirteittäin määräyksissä sanotaan, että sähkökäyttöiset ajoneuvot, jotka sisältävät litiumakkuja, ovat luokkaan yhdeksän luokiteltua vaarallista lastia.

Maakaasulla ja vedyllä kulkevia ajoneuvoja lastina kuljettavat autolautat noudattavat (SOLAS Ch. II-2 Reg.20-1 and IMO MSC.1/Circ. 1471) asetettuja määräyksiä. Tämä tarkoittaa, että kaikissa uusissa aluksissa vuoden 2016 heinäkuusta lähtien sähkölaitteet täytyy olla ex-suojattuja, ilmastoinnin tulee toimia, sekä aluksella tulee olla kannettavia kaasuilmaisimia. Jo olemassa oleville aluksille tulee hankkia kannettavat kaasuilmaisimet, sekä suosituksena sähkölaitteiden ex-suojaus ja ilmastointi.

11 TUKESIN OHJEET VAHINGOITTUNEIDEN AKKUJEN KÄSITTELYYN

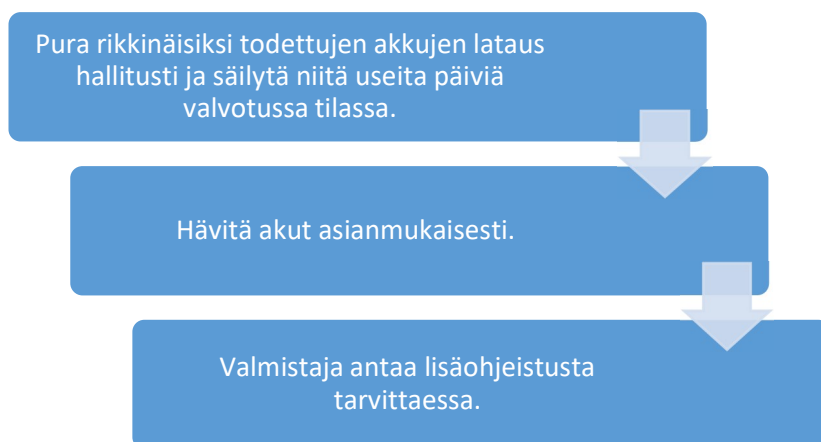
TUKES eli Turvallisuus- ja kemikaalivirasto on antanut seuraavan ohjeistuksen vahingoittuneiden sekä viallisten akkujen käsittelyyn.

Kaikki vahingoittuneet sekä vialliset akut ja akustot tulisi poistaa tilasta ja siirtää erilliseen palosuojattuun tilaan. Siirron aikana huolehdittava henkilöiden turvallisuudesta. (Tukes 2018.)



Kaavio 1. Toimintaohjeet ensitilanteeseen (Tukes 2018)

Kun ensitilanne on ohi, vahingoittuneiden tai viallisten akkujen lataus tulee purkaa hallitusti ja järjestää jälkivalvonta. Akkujen hävitys asianmukaisesti, liisäohjeistus valmistajalta. (Tukes 2018.)



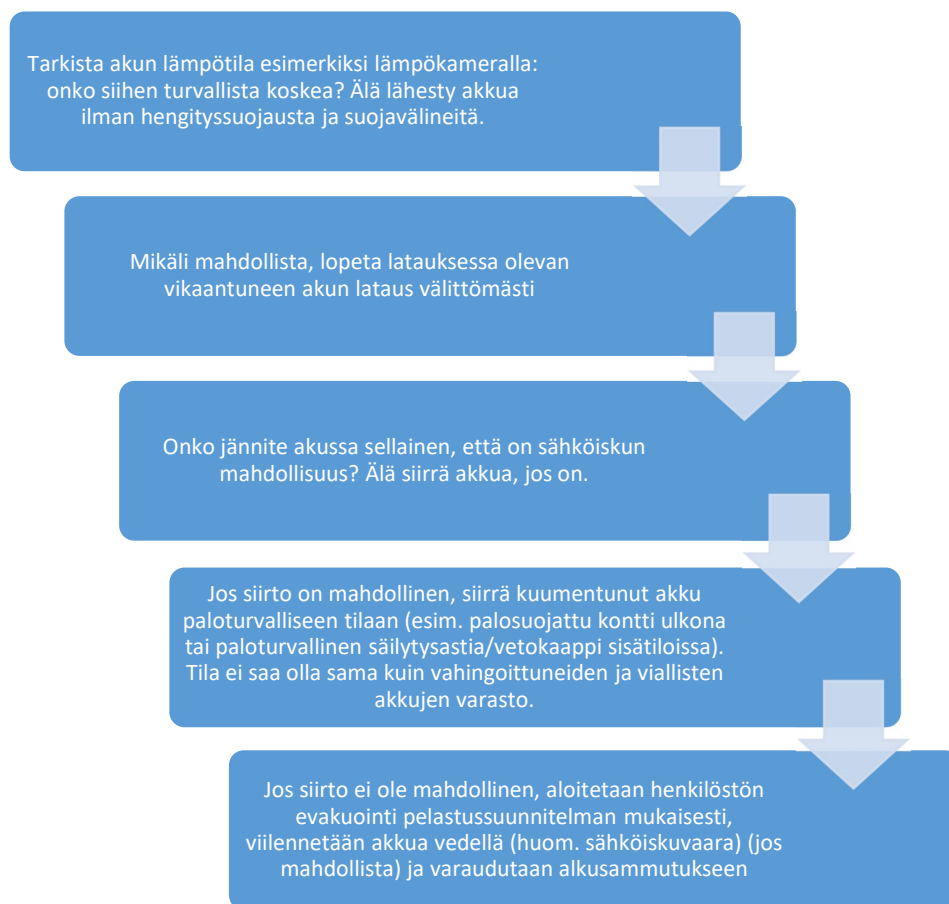
Kaavio 2. Toimintaohjeet ensitilanteen jälkeen (Tukes 2018)

12 TUKESIN OHJEET LÄMPÖKARKAAMISEPÄILLYN AKUN KÄSITTELYYN

TUKES eli Turvallisuus- ja kemikaalivirasto on antanut seuraavan ohjeistuksen lämpökarkaamisepäillyn akun käsittelyyn.

Tarkasta akun tai akuston lämpötila ennen kosketusta, sekä käytä henkilökohtaisia suojavaikineitä. Poista akut latauksesta. Jos akku on jännitteinen, älä siirrä akkua. Kun akkua on mahdollista siirtää, siirrä akku palosuojattuun tilaan. Tila ei kuitenkaan saa olla sama, jossa säilytetään jo viallisiksi tai vahin-

goittuneiksi todettuja akkuja. Jos akkuja ei ole mahdollista siirtää, tulee henkilöstö evakuoida lähialueelta ja valmistauduttava alkusammutukseen. (Tukes 2018.)



Kaavio 3. Toimintaohjeet lämpökarkaamisepäillyn akun käsittelyyn (Tukes 2018)

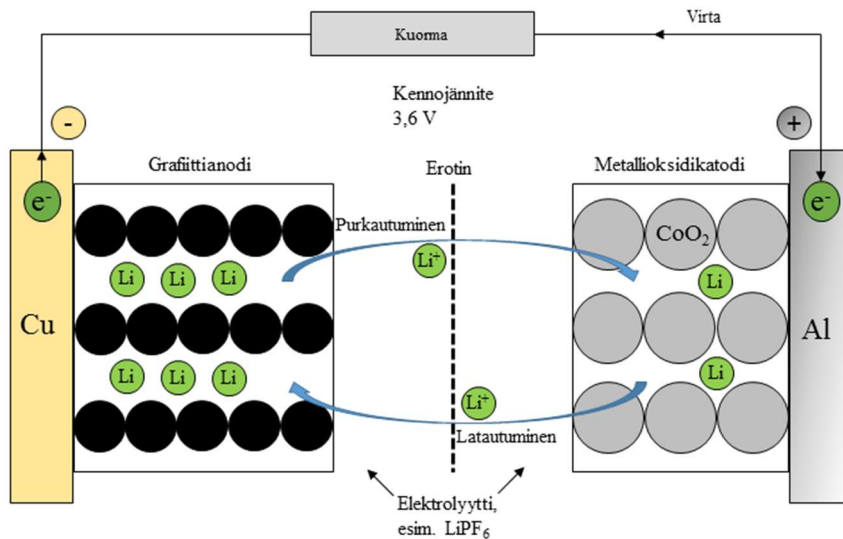
13 SÄHKÖAUTON JA HYBRIDIN AKUSTON PALO

13.1 Syttyminen

Valmistusvian tai vaurion muodostama oikosulku akkumoduulissa voi aiheuttaa kipinöitä, jotka sytyttävät helposti kipinöihin reagoivan litiumin (kuva 11). Litiumioniakun käyttölämpötila on maksimissaan 60 °C. Litiumioniakun todennäköisin itsesytytymissy on lämpötilan nousu liian korkeaksi. Jos kennon ympäristön lämpötila nousee yli 100-120 °C, alkaa se kuumeta itsestään. Tätä kemiallista reaktiota kutsutaan termiseksi karkaamiseksi. Termisellä karkaamisella tarkoitetaan nopeaa, millisekunneissa nousevaa, hallitsematonta lämpö-

tilan nousua. Kennon lämpötila nousee lähemmäs 650-1500 °C, jolloin se lämmittää kennossa olevat viereiset akut. Tämä synnyttää ketjureaktion, jota on hyvin hankala pysäyttää. (Pelastustieto 2016.)

Pelastusopiston TKI-palveluiden erikoistutkija Marko Hassisen mukaan lämpötila nousee hyvin nopeasti erittäin korkeaksi, kun yksi akkukkenno syttyy palamaan. Tämä, mitä todennäköisemmin, lämmittää ympärillä olevia akkukkennoja ja saa prosessin siirtymään viereisiin kennoihin. Ketjureaktio jatkuu, kunnes akkukennot loppuvat, tai se pystytään katkaisemaan jäädyttämällä, ja täten sammuttamaan palo. (Repo 2020.)



Kuva 11. Litiumioniakun toimintaperiaate (Puranen 2017)

Mahdollisia syitä termiselle karkaamiselle:

- Sisäinen oikosulku
- Ulkoinen oikosulku
- Akun yli lataus
- Liian suuri virta, esim. ladataessa

13.2 Palamistapahtuma

Sytyttyään litiumioniakku palaa erittäin korkeassa, 600-1500 °C lämpötilassa, ja se voi pahimmassa tapauksessa räjähtää, levittäen palamismateriaalia ym-

päristöön. Litiumioniakun palaessa muodostuu ympäristöön myrkyllisiä kaasuja ja savua. (Pelastustieto 2016.) Kun akusto ylikuumenee, elektrolyytti haihtuu, ja lopulta poistuu akkukennoista. Tämä voi aiheuttaa todellisia ongelmia varsinkin suljetuissa tiloissa, esimerkiksi tunneleissa, lentokoneissa ja aluksen autokansilla. Kaasut voivat syttyä välittömästi, tai vaihtoehtoisesti ne kerääntyvät ja aiheuttavat räjähdysvaaran. Litiumioniakun elektrolyytti on syttyvää ja sisältää yleensä litiumheksafluorifosfaattia (LiPF₆) tai muita fluoria sisältäviä litiumsuoloja. Korkeassa lämpötilassa elektrolyytti ja jossain määrin muut pariston osat, kuten esimerkiksi polyvinyylideeni, fluoridin sidosaine (PVdF), voivat muodostaa myrkyllisiä kaasuja kuten vetyfluoridia (HF), fosforipentafluoridia (PF₅) ja fosforyylifluoridia (POF₃) hiili-, alumiini-, litium-, kupari- ja kobolttioksidgeja. Paloryhmän tulee käyttää itsenäistä hengityslaitetta. (Battery University 2019.)

13.3 Sammutus

Yhdysvalloissa 2018 tapahtunut Tesla sähköauton palo osoittaa kuinka arvaamattomia sähköautojen palot voivat olla. Tässä tapauksessa auto saatiin sammutettua moottoritiellä ensimmäisen kerran, jonka jälkeen auto hinattiin purkamolle. Tämän jälkeen auton litiumioniakku syttyi uudelleen vielä kaksi kertaa vuorokauden sisällä ensimmäisestä kerrasta. Ja yllättäen kerran vielä kuusi päivää myöhemmin, kertoo Automotive News akkujen turvallisuutta käsittelevässä artikkelissaan. (Niemi 2018.)

Suomessa tulipalot on jaettu seuraaviin paloluokkiin:

A-luokka, kiinteät, orgaaniset, kuitumaiset ja hehkuen palavat aineet (puu, paperi, tekstiili, hiili).

B-luokka, nesteet tai nestettä muodostava aineet (benssiini, öljy, lakka, terva, dimetyylieetteri, etanoli, steariini, parafiini).

C-luokka, kaasut (metaani, propaani, butaani, vety, asetyleeni, maakaasu).

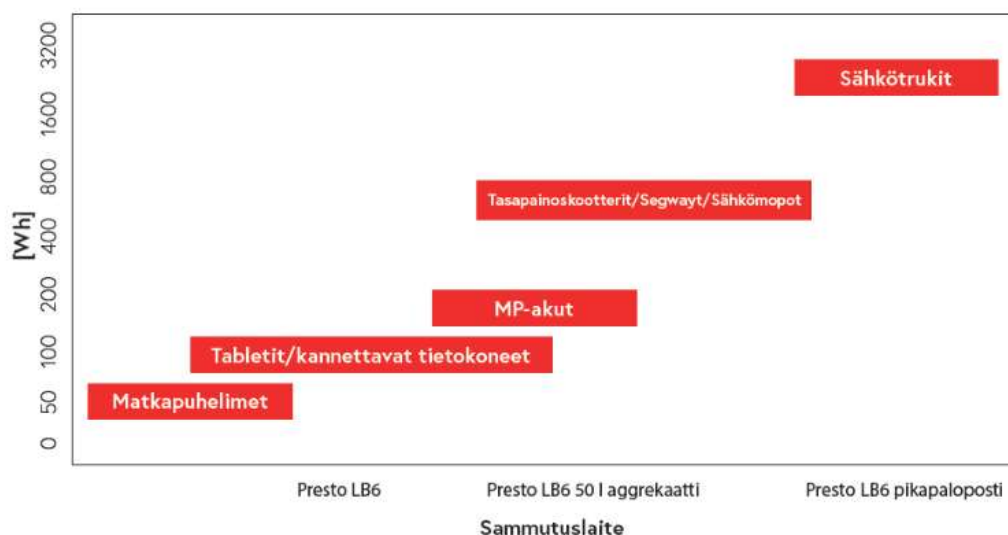
D-luokka, metallit (alumiini, magnesium, litium, natrium, zirkonium, seokset).

F-luokka, eläin- tai kasvirasva. (SFS-EN 2 s.a.)

Sammuttimen palo- ja teholuokka kertovat minkälaisiin paloihin se on tarkoitettu, ja kuinka hyvä sammutusteho siinä on. Mitä suurempi numeerinen arvo, sitä tehokkaampi sammutin.

Litiumakut voidaan luokitella paloluokkaan D. Paloluokka D sisältää voimakkaasti reagoivat metallit. Nämä metallit reagoivat voimakkaasti perinteisiin sammutteisiin, kuten vesi, vaahdot ja hiilidioksidi. Tästä syystä on kehitetty erityisiä sammutustarkoituksiin soveltuvia jauheita, jotka muodostavat erityisen pinnoitteen metallien pinnalle, ja täten katkaisevat kemiallisen reaktion.

Tarvittava jäähdytyskapasiteetti riippuu akuston koosta. Tehokkaampaan akustoon vaaditaan suurempaa jäähdytyskapasiteettia. Pienempien litiumioniakkuja sisältävien laitteiden paloja voidaan sammuttaa yleensä käsisammuttimella (6 litraa), kuten tietokoneet ja älypuhelimet. Yleisesti tiloihin, joissa säilytetään suurempia määriä litiumioniakkuja sisältäviä laitteita, suositellaan vähintään kahta sammutinta. Sammuttimen suositeltu käyttöetäisyys on maksimissaan 10 metriä. (Vilmi 2018.)



Kuva 12. Sammuttimien soveltuvuus akustopaloihin (Vilmi 2018)

13.3.1 Tukahduttaminen

Vikaantuessaan tai erottimen rikkoutuessa elektrodit menevät keskenään oikosulkuun, joka nostaa kennon lämpötilan nopeasti suureksi. Tällöin katodimateriaalina käytetystä metallioksidista vapautuu happea, ja akusto voi syttyä

palamaan. Tämä muodostaa litiumioniakuissa merkittävän ongelman sammutusta ajatellen. Koska palamiseen tarvittavat lämpö ja happi syntyvät samasta lähteestä, palon sammuttaminen tukahduttamalla ei ole enää mahdollinen. (Puranen 2017.)

Litiumioniakkupalojen sammuttamiseen suositellaan käytettäväksi grafiitti- ja kuparijauhesammuttimia. Mahdollisuuksien mukaan sammutukseen voi käyttää myös hiekkaa, jauhattua ja kuivaa dolomiittia tai natriumkarbonaattia. Nämä aineet tukahduttavat akkupaloa. (Huttu 2019.)

13.3.2 Vesisammutus

Akun kennostot ovat yleensä niin tiukasti pakattuja, että vettä on miltei mahdollonta saada akun sisään. Akuissa oleva suojakuori suojaa myös akustoa vedeltä. Akkujen yleisesti käytetty sijoitus auton pohjassa vaikeuttaa myös osaltaan veden kohdistamista akkuihin. Akun anodipuoli on yleensä grafiittia, joka on palavaa materiaalia. Elektrolyytinä eli väliaineena käytetään useimmiten jotain litiumsuolaa orgaaniseen nesteeseen liuotettuna. Elektrolyytti on myös täten palavaa materiaalia. Akun katodipuoli on yleensä litiumin ja muiden metallien fosfaatteja ja oksideja. Nämä eivät ole palavaa materiaalia. Akustoissa ei tiettävästi ole mitään, joka reagoidessaan veden kanssa aiheuttaisi vaaratilanteita. (Lautkaski 2016.)

Isoilla ja avonaisilla autokansilla perinteinen katossa sijaitseva sprinkleri ei anna riittävää suojausta. Katossa sijaitseva sprinkleri ei pääse jäähdyttämään sähköautojen pohjaan sijoitettua akustoa tehokkaasti. Toisaalta myös veden käyttäminen voi pahimmillaan muodostaa vetykaasua, joka sekoituessaan ilman kanssa voi muodostaa räjähtävän seoksen. Sammutusvesi aiheuttaa myös logistisia ongelmia sammutuksessa liuenneiden yhdisteiden takia. Palotilanteissa käytetyistä sammutusvesistä on löydetty kohonneita fluoridi- ja kloridipitoisuuksia. Sellaisenaan sammutusvettä ei saa laskea luontoon, vaan se tulisi kerätä käsiteltäväksi. (Pelastustieto 2016.)

13.3.3 Sammutuskontti

Maailmalla on käytetty sähköautojen sammutukseen vedellä täytettyjä siirto-kontteja, johon sähköauto upotetaan. Näin on saatu sähköauto luotettavasti

sammutettua ja uudelleen syttymiset estettyä. Vuoden 2020 alussa uutisoitiin Tanskassa kehitetystä sammutuskontista, joka on suunniteltu nimenomaan tähän tarkoitukseen.

Tanskalainen, Kööpenhaminan lähellä toimiva paloviranomainen Beredskab Øst, on syksyllä 2019 saanut käyttöönsä Pohjoismaiden ensimmäisen sähköautopalojen sammutukseen suunnitellun suljettavan erikoiskontin (kuvat 13,14). Palava auto hinataan vinssin avulla konttiin, joka on varustettu suutinjärjestelmällä. Suutinjärjestelmä ruiskuttaa sammutusveden kovalla paineella alhaalta käsin akustolle (kuva 15). Vesi kierrätetään suljetussa järjestelmässä, ja määrällisesti riittää haastavaankin sammutukseen. (MTV-uutiset 2020.)



Kuva 13. Sammutuskontti ja kuljetusajoneuvo (Grøndahl 2019)



Kuva 14. Sammutuskontti (Grøndahl 2019)



Kuva 15. Sammutuskontin vesisammutusjärjestelmä (Grøndahl 2019)

Kyseisen sammutuskontin voisi olettaa soveltuvan hyvin sähköautojen sammuttamiseen maa puolella, mutta laivaolosuhteissa haasteita tulee siirrettävyyden, säilytyksen, sekä jälkitöiden osalta. Jos sähköautot tulevaisuudessa voidaan sijoittaa omaan, niille varta vasten suunniteltuun palo-osastoon, kyseistä menetelmää voitaisiin mahdollisesti soveltaa myös laivaolosuhteisiin. Joka tapauksessa se vaatii uudelleen järjestelyjä autokannen lastaukseen.

13.4 Rajoittaminen

Sähköauton palonrajoittamisella tarkoitetaan palavan ajoneuvon eristämistä muusta palavasta materiaalista vähintään 15 m päähän. Palon leviämistä voidaan rajoittaa myös jäähdyttämällä akustoa. Optimaalisessa tapauksessa akusto tulisi irrottaa ajoneuvosta, mutta tämä on erittäin haastavaa tai mahdollonta todellisessa palotilanteessa. Jos sammutuksen jälkeen vaarana on että akut vuotavat elektrolyyttiä, tulee niiden käsittely- ja varastointitiloissa olla vuodonkeruujärjestelmä, joka on palon- ja kemikaalienkestävä. Auto- ja sääkansiin skupperit tulisi olla myös tukittuina, tai vaihtoehtoisesti suora valuminen sääkannelta mereen tulisi estää. (Pelastustieto 2016.)

13.5 Jäähdyttäminen

Palavan akuston jäähdyttäminen on avain asemassa sähköauton sammutustöissä. Sähköauton sammuttaminen tulisi tehdä jäähdyttämällä akustoa siten, että se ei syty uudelleen. Mitä tehokkaampi akusto, sitä suurempi jäähdytyskapasiteetti tarvitaan.

Saksassa 2016 tehdyissä sammutuskokeissa kävi ilmi, että jäähdytyksestä saadaan huomattavasti tehokkaampaa veteen lisättyjen pintajännitystä rikkovien lisäaineiden avulla. Tällöin sammutusvesi pääsee tunkeutumaan akuston sisälle, mikä mahdollistaa kennojen tehokkaamman jäähdytyksen. (Puranen 2019)

Maa puolella pelastuslaitoksen käyttämiä sammutusmenetelmiä voidaan tietyissä määrin käyttää hyväksi myös aluksilla. Tässä muutamia esimerkkejä pelastusopistolla yliopettajana työskentelevän Ismo Huttun, pelastusyksikön ensitoimenpiteitä täydentävät sammutusmenetelmät, vuoden 2019 sammutustekniikan koulutusmateriaalista.

PAINEILMAVAHAHTOJÄRJESTELMÄ (CAFS, COMPRESSED AIR FOAM SYSTEM)

Järjestelmän toimintaperiaate:

- Paineilmaa ja vaahtoa sekoitetaan sammutusveteen
- Seos tehdään sammutuslaitteistossa tai pumpussa valmiiksi vaahtoliuokseksi (vesi + vaahdote 0,3% + ilma), tällä menetelmällä pienestä vesimäärästä saadaan runsaasti sammutetta (300 litraa vettä = 2000 litraa valmista sammutetta).
- Tässä menetelmässä myös virtaushäviöt ovat pieniä, joten se voidaan selvitää pitkälle matkalle (200 m).
- Seos pääsee tunkeutumaan syvälle palavaan materiaaliin ja se muodostaa materiaalin pinnalle kuumuutta kestävän ja jäähdyttävän kerroksen.
- Käytettäessä paineilmavaahtosammutusta, tehokkain jäähdytys saadaan aikaan käyttämällä apuna lämpökameraa, jotta seos voidaan kohdistaa oikeaan paikkaan.

KORKEAPAINESAMMUTUSLAITTEISTO (UHPS, ULTRA-HIGH-PRESSURE SYSTEM)

Laitteiston toimintaperiaate:

- Korkeapainesammutuslaitteistolla saadaan pienellä vesimäärällä (1 litra) ka-
tettua suuri pinta-ala (100 m²).
- Suuri jäähdytyskyky pienellä vesimäärällä (38l/min)
- Suihkun paine 100 baaria ja kantama 7-15 metriä.
- Laitteiston sammutusteho perustuu palon tukahduttamiseen, jäähdyttämi-
seen sekä sillä pyritään katkaisemaan pyrolyysi palavan materiaalin pinnalta.
- Tehokkain sammutustulos saadaan käyttämällä apuna lämpökameraa.
- Huomioitavaa on, että laitteiston vesivirta on pieni ja täten ei anna sammutta-
jille tarpeellista suojaa pidemmälle keittyneissä paloissa.

AEROSOLISAMMUTE eli HEITTOSAMMUTIN

Sammuttimen toimintaperiaate:

- Perustuu palon ketjureaktion kemialliseen katkaisuun, ei aiheuta jälkivahin-
koja kuten monet jauheet.
- Huomioitavana seikkana sammutin sekoittaa mahdolliset savukaasut ja täten
peittää näkyvyyden kokonaan palavassa tilassa. Lämpötilojen tasaantuessa
savukaasut voivat lämpötilaerojen takia levitä muihin tiloihin.
- Heittosammutin on tehokas väline palon rajoittamiseen siinä tapauksessa,
jos sammutushyökkäys ei ole tarpeellinen.

Edellä mainittujen sammutusmenetelmien kanssa on huomioitava, että sam-
mutin yleisesti sammuttaa vain liekit. Varsinkin litiumioniakuissa lämpökarkaa-
minen jatkuu ja palo voi syttyä uudestaan. Akkuja tulee jäähdyttää vedellä,
jotta uudelleen syttyminen estetään.

14 KAASUAUTON KAASUSÄILIÖN PALO

14.1 Syttyminen

Kaasuautot sisältävät paineenalennuslaitteiston PRD (Pressure Relief Device), joka aktivoituu yleensä noin 110 °C lämpötilassa. Riippuen palon sijainnista, paineenalennuslaitteiston anturi ei välttämättä aktivoitu ajoissa, jos lämpötila ei ylety syystä tai toisesta anturille. Tästä syystä kaasuautoissa on yleensä myös paineenalennuslaitteisto, joka aktivoituu myös korkeasta paineesta (340 baaria). Paineenalennusventtiilit on normaalisti suunnattu ylös tai sivuille.

Maakaasu syttyy palamaan kipinästä, jos sitä on sekoitettuna ilmaan 5-15%. Maakaasu on ilmaa kevyempää, joten se nousee ylöspäin kohti mahdollisia ilmanvaihtoventtiilejä. Vuotanut maakaasu suljetussa tilassa voi aiheuttaa räjähdyksen. Kaasuauton tankin syttyessä, tai välittömästi tankin rikkoutuessa, se voi muodostaa tulipallon johtuen kaasujen yhtäkkisestä vapautumisesta. (Ying 2018.)

Tutkimuksessa havaitut kaasuautojen yleisimmät syttymissyyt:

- Huoltojen laiminlyönti (kaapeleiden eristykset, jälkiasennetut kaasujärjestelmät)
- Kuljettajan huolimattomuus (tupakointi, tulenarat materiaalit, liian pitkä lämmityksen käyttö)
- Huonolaatuiset jälkiasennukset (bensiniijärjestelmä → kaasujärjestelmä)
- Huonolaatuiset komponentit (hintaa, toimittajat)
- Kaasuvuodot (tankin ylitäyttö, huonot tiivisteet, hidas ajan myötä tapahtuva vuoto)
- Onnettomuudet/törmäykset

14.2 Palamistapahtuma

Yleisesti kaasukäyttöisissä henkilöautoissa käytetään paineistettua maakaasua. Raskaassa kalustossa on tosin otettu jo jossain määrin käyttöön nesteytetty maakaasu (LNG). LNG on varastoituna tankkiin -162 °C lämpötilassa ja

16 baarin paineessa. LNG palaa hitaammin kuin esim. bensiini tai diesel. Sitä ei myöskään teoriassa lasketa räjähtäväksi, vaikkakin syttyessään se voi aiheuttaa suurta tuhoa. LNG tankin vuotaessa kaasu painuu lähelle maanpintaa, ja riippuen ympäröivästä lämpötilasta, se höyrystyy ja kohoaa ylöspäin ilmaa kevyempänä. Höyrystyneen LNG:n itsesyttymislämpötila on 620 °C. LNG on hajuton kaasu, ja nestemäisenä käsiteltynä vaatii käyttäjältä henkilökohtaisten suojavarusteiden käyttöä. Paineistettua maakaasua (PNG) käyttävien kaasuautojen yleisin palotyyppi on suihkuliekki. Suihkuliekki muodostuu kaasun vuotaessa tankista. Paineistettu maakaasutankki voi räjähtää, tai johtaa räjähtävään paineaaltoon. Tätä ilmiötä voidaan kutsua kaasusäiliön repeämiseksi tai kaasun paisuntaräjähdykseksi. Tällaisessa tapauksessa huomattavasti korkeammassa paineessa olevan kaasu vapautuu ympäröivään tilaan muodostaen paineaallon. (Ying 2018.)

Kaasuautoista puhuttaessa tulee ottaa huomioon myös epäsuorat syttymissytyt. Vaikka säiliön sisältö itsessään ei olisi syttyvää, voi viereisen auton tai muun lähellä olevan palokuorman palaminen nostaa kaasuauton säiliön lämpötilaa. Tällöin voidaan puhua BLEVE (Boiling liquid expanding vapour explosion) – paineistettua tai nesteytettyä kaasua sisältävien säiliöiden räjähdystyypistä. Tämä tarkoittaa kiehuvan nesteen tai höyryn laajenemisesta, ja tästä johtuvan paineen nousun aiheuttamasta räjähdyksestä. (Ying 2018.)

14.3 Sammutus

Kaasupalot kuuluvat paloluokkaan C. Tähän luokkaan voidaan lukea myös maakaasu. Kaasupaloihin käytetään yleensä C-luokan sammutteita, jotka perustuvat tukahduttamiseen. Hiilidioksidin tai sammutetta sisältävän vedenpäästäminen palotilaan ovat mahdollisia kaasupalojen sammutusmenetelmiä. Jos kaasuvuoto on syntynyt esimerkiksi repeytyneen tankin takia, tulisi kaasun virtaaminen ympäristöön estää jollain tavoin. Parhaassa tapauksessa sulkea venttiili, mutta esimerkiksi tankin revetessä tämä ei ole mahdollista. Kaasupalon ja räjähdysen vaara on olemassa niin kauan, kun palavaa kaasua leviää ympäristöön. Jos kaasuvirtauksen katkaisu ei ole mahdollista, tulee paloaluetta jäähdyttää sekä rajoittaa palon leviämistä. Tässä tapauksessa kaasun annetaan palaa loppuun, jolloin palo sammuu lopulta itsestään. (Ying 2018.)

14.4 Rajoittaminen

Kaasukäyttöisen ajoneuvon palon rajoittamista tulisi toteuttaa mahdollisuuksien mukaan. Ennen kaasutankin irrottamista ajoneuvosta, tulee sen painetta alentaa. Kaasutankki tulisi siirtää turvalliselle alueelle, jos mahdollista (kuva 16).



Kuva 16. Tieliikenneonnettomuudessa yhteydessä irrotettu raskaan kaluston LNG-säiliö (CTIF s.a.)

15 USA:N PALONTORJUNTALIITON NFPA:N VUONNA 2013 PÄÄTTYNYT TUTKIMUSPROJEKTI SÄHKÖAUTON SAMMUTUKSESTA

15.1 Tutkimuksen toteutus

Vuonna 2013 päättyneen USA:n palotorjuntaliiton NFPA:n tutkimusprojektin tarkoituksena oli kerätä tietoa sähköautojen sekä hybridien tulipaloista ja sammutusmenetelmistä. Tavoitteena oli täydentää palokuntien ohjeistusta sähköautojen ja hybridien sammutukseen.

Tutkimuksessa käytettiin kahta eri sähköautoissa käytössä olevaa litiumioniakkua. Varauskyvyltään akut olivat 4,4 kWh ja 16 kWh. Tutkimuksessa käytettiin autopalosimulaattoria. Sammutusmiehistön vahvuus oli 1+1+2, ja sammutusryhmän käytössä oli 45mm:n paloletku ja suihkuputki. Veden suihkutuspaine oli kokeissa 5,2 baaria. Sammutusryhmiä ei ohjeistettu mitenkään liittyen litiumioniakkujen sammutukseen.

Ensimmäisessä kokeessa pienempi akku saatiin sammutettua 23 sekunnissa, mutta se syttyi useita kertoja uudelleen. Lopullisesti pienemmän akun palo saatiin sammutettua 6 minuutin kohdalla. Tällöin vettä oli kulunut sammutukseen 1040 litraa. Akun lämpötila vaihteli suuresti, mittaustuloksia saatiin väliltä 400-1400 °C. Kymmenen minuutin päästä sammutuksesta akun lämpötilaksi mitattiin 38 °C. Lämpösäteilyarvo oli suurimmillaan 3,5 kW/m², kun etäisyyttä oli 1,5 metriä. Toinen koe ei eronnut ensimmäisestä muutoin, kun hieman pidemmän sammutusajan, 36 minuuttia, ja suuremman vesimäärän, 1670 litraa, osalta.

Kolmas koe erosi hieman kahdesta ensimmäisestä, koska ajoneuvon penkkien syttyminen suurensi liekkejä. Kolmannen kokeen ensimmäiseen sammutukseen kului aikaa vain 72 sekuntia, mutta loppujen lopuksi autoa sammutettiin 47 minuutin ajan. Vettä kului kokonaisuudessaan sammutukseen 4000 litraa. Akusta mitatut lämpötilat vaihtelivat 650 °C ja 850 °C välillä. Lämpösäteilyarvo oli suurimmillaan 11,7 kW/m², kun etäisyyttä oli 1,5 metriä.

Varauskyvyltään suuremman akun palokokeessa lattia vaikeutti sammutusta estäen suoran suihkun akustolle. Sammutus toteutettiin suihkuttamalla lattiaa lyhyin suihkuin 26 minuutin ajan. Tässä tapauksessa vettä kului sammutukseen 6640 litraa. Akusta mitattiin lämpötiloja 280 °C ja 1090 °C väliltä. Akun sisäosan lämpötila vaihteli 570 °C ja 1120 °C välillä. Lämpösäteilyarvo oli suurimmillaan 2,2 kW/m² kun etäisyyttä oli 1,5 metriä. Akku jäähdyi sammutuksen jälkeen ympäröivään lämpötilaan neljässä tunnissa ja akun sisäosat 12 tunnissa.

Varauskyvyltään suuremman akun toisessa palokokeessa lattiaa suihkutettiin 37 minuutin ajan. Tässä sammutuksessa vettä kului 10 000 litraa. Akusta mitattiin lämpötiloja 550 °C ja 890 °C väliltä. Lämpösäteilyarvo oli suurimmillaan 2,1 kW/m², kun etäisyyttä oli 1,5 metriä. Kokonaisuudessaan akku jäähdyi ympäröivään lämpötilaan 13 tunnissa.

Suuremman akun kolmannessa palokokeessa auton etuistuin leimahti liekkeihin 4,5 minuutin kohdalla, ja auton sisäosan täyden palamisen vaihe saavutettiin kuuden minuutin kohdalla. Tässä kokeessa sammuttajat yrittivät, erona edellisiin kokeisiin, sammuttaa akkua eri suunnista. Tämä menetelmä todettiin

toimivaksi sammutusajan ollessa 14 minuuttia ja veden kulutuksen 4400 litraa. Akusta mitattiin lämpötiloja 800 °C ja 1500 °C väliltä. Lämpösäteilyarvo oli suurimmillaan 8,1 kW/m² kun etäisyyttä oli 1,5 metriä. Kokonaisuudessaan akku jäähdyi ympäröivään lämpötilaan kolmessa tunnissa.

15.2 Tutkimuksen tulokset ja sammuttajien haastattelut

Polttokokeissa havaittiin, että elektrolyytin palaminen aiheutti hyvin havaittavia valkoisen höyryn ja savun purkauksia akkukotelon raoista. Akkukotelossa ilmeni myös pamauksia, suhahduksia, kipinöitä ja valokaaria palon aikana. Polttokokeiden aikana ei tapahtunut mainittavia räjähdyksiä, kotelo ei revennyt, eikä siitä lennellyt mitään ympäristöön. Kokeessa havaittiin myös, että akkukotelo esti suoran vesisammutuksen. Siitä huolimatta, että melkein jokaisessa palokokeessa ensimmäinen sammutus saatiin suoritettua melko nopeasti, akkukotelon raoista purkautuva höyry syttyi uudelleen useita kertoja.

- Akut syttyivät useita kertoja ensimmäisten onnistuneiden sammutusten jälkeen. Reaktion karkaamisen mahdollisti akun sisällä säilyvä korkea lämpötila.
- Akun uudelleen syttymisen yhteydessä havaittiin pamahduksia ja suhahduksia, höyryn purkauksia, kipinöintiä ja valokaaria. Uudelleen syttyminen saatiin pysäytettyä vasta, kun akuston lämpötila oli jäähdytetty tarpeeksi alhaiseksi.
- Varauskyvyltään suuremman akun kahdessa sammutuskokeessa yhden sammuttajan happipullosta loppui happi. Tämä tulee ottaa huomioon tulevaisuudessa litiumioniakkuja sammutettaessa.
- Pienemmän akun sammutuksessa päästiin jäähdyttämään kaikkia pintoja, pois lukien pohja. Suuremman akun sammutuksessa lattia hankaloitti jäähdytystä. Nämä seikat tulee myös ottaa todellisessa akkupalossa huomioon.
- Kokeissa todettiin, että sähkö- ja hybridautojen paloissa muodostuvat savukaasut, eivät ole haitallisempia kuin polttomoottoriautojen palossa. Sammuttajien on käytettävä paineilmahengityslaitetta 15 m:n säteellä palavasta tai sammutetusta autosta.
- Palokokeissa ei käytetty vedessä lisäaineita tehostamaan sammutusta.

- Jos vettä ei ole saatavissa riittävästi palon sammuttamiseen, voidaan akun antaa palaa loppuun, jos se ei aiheuta varaa ihmisille tai ympäristölle. Kokeissa loppuun palaminen kesti 90 min, mutta akuista purkautui kaasua ja akusta mitattiin korkeita lämpötiloja vielä tuntien ajan.
- Kertaalleen sammutettu sähköauto tai hybridi sisältää suuren riskin uudelleen syttymiseen, joten se on eristettävä vähintään 15 metrin etäisyydelle kaikesta palokuormasta.

16 ALUKSEN PALOHENKILÖSTÖN TOIMINTA SÄHKÖ- JA KAASUAUTOJEN PALOTILANTEESSA

16.1 Ennaltaehkäisy

Sähkö- ja kaasukäyttöisten ajoneuvojen syttymistä pystytään ennaltaehkäisemään monin keinoin.

Ajoneuvojen kartoitus ja sijoitus

Sähkö- ja kaasuajoneuvot tulisi kartoittaa jo lastaustilanteessa ja sijoittaa omaan palo-osastoonsa. Tällöin suljetaan pois sähköautojen syttyminen bensiinikäyttöisten autojen tulipaloista, sekä myös päinvastoin, bensiinikäyttöisten autojen syttymisen sähköautojen paloista.

Ilmanvaihto

Sähkö- ja kaasukäyttöiset ajoneuvot tulisi sijoittaa mielellään avonaiselle autokannelle, tai muuten hyvin ilmastoidulle osastolle. Mahdollisten kaasuvuotojen muodostamaa palokuormaa pystytään näin keventämään. Myös myrkyllisten ja kuumien palokaasujen kerääntymistä ja leviämistä voidaan pienentää tai ohjata ulos hyvällä ilmanvaihdolla.

Kaasuvuotojen havaitsemislaitteet

Tankkien kaasuvuotoja pystytään havaitsemaan erilaisilla siihen tarkoitukseen kuuluvilla laitteilla. Markkinoilla on nykyään kaasumittareita erinäisiin tarkoituksiin.

- Alkometrit
- Yhden kaasun mittarit
- Monikaasumittarit
- Syttymisvaaramittarit
- Vuodonilmaisumittarit
- Kiinteät kaasumittarit

Lämpökamerat

Mahdollisia sähköautojen akustojen ylikuumentumisia voidaan havaita erilaisilla lämpökameroilla. Alla esimerkkinä havainnekuva (kuva 17) henkilöautosta lämpökameralla kuvattuna. Tällä tekniikalla voitaisiin mahdollisesti paikallistaa kuumenevia akustoja ennen, kun ne syttyvät palamaan.



Kuva 17. Havainnekuva autosta lämpökameralla kuvattuna (Legendary videos)

16.2 Palo- ja kaasuilmoitinlaitteisto

Automaattiset paloilmoitinjärjestelmät osaltaan suojaavat autokantta, mutta lisäksi se tulisi varustaa kaasuilmaisimilla, sekä mahdollisilla kipinäilmaisimilla sähköautojen paloa silmällä pitäen. Tällöin mahdolliset kaasuautojen tankkien vuodot pystytään havaitsemaan ennen kaasun kerääntymistä syttymisherk-

kään tilaan, sekä sähköauton syttymiseen johtava mahdollinen kipinäointi voidaan havaita ajoissa. Autokansille tulisi myös optimaalisessa tapauksessa järjestää palokierrosten yhteydessä kaasupitoisuuden mittaus erillisellä kannettavalla kaasumittarilla. Palokierroksiin voitaisiin yhdistää myös kannettava lämpökamera, jolla voitaisiin havaita paloherkäksi kuumentuneita akustoja.

16.3 Palonsammutusmenetelmät

Aikaisemmin tutkimuksessa esitelty sammutuskontti mahdollistaisi luotettavan sammutuksen, mutta ongelmaksi muodostuu kontin liikuttelu ahtailla autokansilla. Mikäli aluksiin rajattaisiin sähkö- ja kaasuajoneuvoille oma tilava palosastonsa, sen käyttömahdollisuuksia voitaisiin kehittää aluksille. Maailmalla on myös kehitelty sähköautojen sammutukseen tarkoitettuja jäähdytysvesiputkia.

Viking Linella täyssähkö- ja hybridiajoneuvojen palotilanteisiin on kehitetty suihkuputki, joka sijoitetaan palotilanteessa palavan ajoneuvon alle. Suihkuputki voidaan liittää aluksen omaan palolinjaan. Suihkuputken toiminta perustuu sprinklerityyppiseen vesisuihkuun, joka saadaan kohdistettua auton pohjassa sijaitsevaan akustoon. Suihkuputkia on varattuna kaksi jokaista autokantta kohden. Venttiilillä päästään säätelemään suihkuputken virtausta sammutustehtävään sopivaksi. Suihkuputki soveltuu myös kaasu- ja polttokennoautojen sammutukseen. (Mäenpää 2019.)

Sähköpaloihin soveltuvilla käsisammuttimilla voidaan ohjata ja rajata paloa. On kuitenkin huomioitava, että vaikka palo saataisiin sammutettua, se ei jäähdytä akustoa tarpeeksi estääkseen luotettavasti uudelleen syttymisen.

Jäähdytys on avain asemassa sähköauton palonsammutuksessa. Paras jäähdytystulos on saatu tutkitun aineiston mukaan pienipisaraisella ruiskulla tai sumulla, sekä lisänä mahdollisesti käytetty veteen sekoitettu sammute.

Happea sivuuttavat sammutusjärjestelmät kuten CO₂- ja inergen-kaasusammutusjärjestelmät ovat mahdollisia liekin sammuttajia, mutta ne eivät jäähdytä akustoa. Ne ovat myös osoittautuneet tehottomiksi, jos palotapahtumassa muodostuu happea.

17 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähkö- ja kaasukäyttöisten ajoneuvojen yleistyessä paloturvallisuus kysymykset tulevat nousemaan esille yhä enenevässä määrin. Opinnäytetyötä tehdessä ongelmaksi muodostui lähdetiedon paikkansa pitävyyden varmistaminen sekä ajankohtaisuus. Tällä hetkellä, kun aihe on uutisissa ja mediassa, sekä alan julkaisuissa vahvasti esillä, uutta aineistoa tulee viikoittain. Tämä tarkoittaa sitä, että uutta aineistoa on saatavilla paljon, mutta vaarana on aineiston ja tutkimustiedon nopea vanheneminen.

Paloturvallisuuden kehittäminen tulee aloittaa autojen käyttövoiman kartoituksesta jo laivaan saavuttaessa, ajoneuvojen sijoittamisesta autokannella, paloilmoituslaitteiston toimivuudesta, sekä aluksen henkilökunnan palonsammutusmenetelmistä ja palon rajauksen mahdollisuuksista. Aluksen palohenkilöstöä tulee lisäkouluttaa näihin erikoistilanteisiin, jotka eivät ole erikoisia enää tulevaisuudessa. Mahdollisesti myös aluksien autokansien uudelleenjärjestelyt tulevat olemaan välttämättömiä, jos halutaan varmistaa aluksen paloturvallisuus jatkossakin. Tehokkaimmiksi sähkö- ja kaasuajoneuvojen sammutusmenetelmiksi osoittautui tätä tutkimusta tehdessä sähköautojen tapauksessa jäähdytys. Kaasuautojen osalta tehokkaimpana menetelmänä voidaan pitää ennaltaehkäisyä. Tällä tarkoitetaan kaasuilmaisimien sekä valvontalaitteiden tehokasta käyttöä, jotta huonokuntoisien tankkien kaasuvuodot pystytään paikallistamaan ajoissa. Sähköautopalojen ennalta ehkäisyssä voidaan ottaa käyttöön lämpökamerateknologia, joilla voidaan mahdollisesti paikallistaa kuumenevia akustoja.

18 POHDINTA

Kauppalehden artikkelissa 14.01.2020 kerrotaan Johns Hopkins Applied Physics Laboratoryn tutkijoiden kehittäneen litiumioniakun, joka on täysin immuuni toimintahäiriöille.

Vuonna 2017 yliopiston tutkijat kehittivät puukotusta, viiltoa, taittamista, liottamista ja ampumista kestävästä akun. Vuonna 2020 tutkijat kertoivat jatko-

hittäneensä akun palonkestäväksi. Ratkaisu tämän kaltaiseen kaiken kestävään akkuun on anodin ja katodin väliaineena käytetyissä elektrolyyteissä. (Virtanen 2020.)

Yllä esiteltyt innovaatiot lupaavat kehitystä tämän tutkimuksen esille nostamiin ongelmiin, mutta kehitystyö tulee viemään aikaa, ja todennäköisesti vaatii joka tapauksessa aluksien autokansien suunnittelussa uudelleen järjestelyitä.

Tekniikka & Talous verkkosivusto uutisoi 14.03.2020, Litiumakkujen tulipalot estetään uudella ”ylivuototekniikalla” – akku hajoaa turvallisesti vähitellen.

Tässä tapauksessa vaurioituneen akun anodia ja katodia erottavan kalvon optimointi purkaa akun varauksen asteittain 20 lataussyklin aikana, joka täten estää oikosulun aiheuttamat tulipalot. Kalifornian yliopiston (US San Diego) lehdistötiedotteessa kerrotaan, että tutkijat ovat keksineet tähän yksinkertaisen ja toimivan ratkaisun. (Kangasniemi 2020.)

Oikosulku on suurin syy litiumioniakustojen itsesyttymiseen. Tutkijoiden mukaan tämä johtuu dendriiteistä, joita kehittyy akun negatiiviselle navalle. Dendriittien kiteiset ja terävät rakenteet saattavat puhkaista anodia ja katodia erottavan kalvon, jolloin navat pääsevät kosketuksiin ja muodostavat oikosulun. Teoriassa ongelmaan on kaksi ratkaisua, estää oikosulkujen muodostuminen, tai sen vaikutuksia pyritään pienentämään. Tässä tapauksessa tutkijat keskittyivät jälkimmäiseen ratkaisuun ja kehittivät napoja erottavan kalvon rakennetta hitaammin hajoavaksi, jolloin akku hajoaa turvallisesti 20 lataussyklin aikana. Ratkaisu perustuu kalvon toisella puolella olevaan hiilinanoputkista rakennettuun pulijohtavaan kalvoon. Puolijohteet johtavat sähköä heikosti, jolloin napoja erottavan kalvon rikkoutumisesta johtuva vuotovirta alkaa vähäisempänä. (Kangasniemi 2020.)

Toinen vaihtoehto olisi kehittää kalvosta täysin dendriittien kestävä. Mutta koska akun elektrolyytin ionien tulee päästä siirtymään kalvon läpi, on ensimmäinen ratkaisu tutkijoiden mielestä parempi. Tämä tosin rajoittaa käytettävien materiaalien vahvuutta. (Kangasniemi 2020.)

Tämän kaltaiset uudet keksinnöt ja innovaatiot tulevat varmasti ratkaisemaan tällä hetkellä sähköautoihin liitetyt ongelmat. Mutta kehitystyö ei tapahdu yhdessä yössä, ja se, että kyseiset parannukset ulottuvat kuluttajille vie aikansa. Sitä ennen liikenteeseen pääsee vielä suuri määrä vanhoilla akustoilla varustettuja autoja.

Aikaisemman ammattini takia tiesin entuudestaan paloturvallisuudesta maapuolella. Aluksen paloturvallisuus ei sinänsä eroa, varsinkaan valvontalaitteiden osalta, juurikaan maapuolella käytetyistä järjestelmistä. Uutena ja mielenkiintoisena asiana tämän opinnäytetyön kautta tuli sähkö- ja kaasuajoneuvojen paloturvallisuus aluksilla. Aineistoon tutustuessani väkisinkin mieleeni tuli, että miksi näihin asioihin ei ole vielä mitään toimivia ratkaisuja. Tutkimusteni mukaan litiumioniakuilla toimivia sähköautoja on ollut markkinoilla jo yli 20 vuotta.

Tällä hetkellä sähköautojen sammutus perustuu tehokkaaseen jäädytykseen ja kaasuautoilla tärkeää on kaasuvuotojen ennalta ehkäisy. Tulevaisuus näyttää tuleeko kehityksen painopiste olemaan akuston paloturvallisuuden kehityksessä sekä kaasuautojen tiukemmassa kunnonvalvonnassa, vai onko tarvetta kehittää luotettavia sammutuslaitteistoja ja ratkaisuja väistämättömiin sähkö- ja kaasuautojen palotilanteisiin.

Tämän opinnäytetyön tuloksena voidaan pitää toteamusta, että tällä hetkellä vaihtoehtoisilla polttoaineilla kulkevien ajoneuvojen palon sammutukseen ei ole olemassa luotettavia sammutusmenetelmiä, varsinkaan laivaympäristössä. Aineistoon tutustuessani kuitenkin selvisi, että asian eteen tehdään kehitys- ja tutkimustyötä parasta aikaa ja asiaan varmasti tullaan keksimään ratkaisuja lähitulevaisuudessa.

Jatkotutkimuksia ajatellen voidaan nostaa esille kysymyksiä, kuten tuleeko kehityksen painopiste olemaan akuston paloturvallisuuden kehityksessä ja kaasuautojen ennakoivassa kunnonvalvonnassa, vai onko tarvetta kehittää luotettavia sammutuslaitteistoja ja ratkaisuja väistämättömiin sähkö- ja kaasuautojen palotilanteisiin. Tätä opinnäytetyötä tehdessä huomasin aiheen olevan niin ajankohtainen ja kehitystyön parhaimmillaan, että aineisto vanheni parhaimmillaan viikoittain. Kun uutisointia aiheesta seuraa, on vaikea

vielä tässä vaiheessa nostaa mitään luotettavaa ja kaiken kattavaa ratkaisua esille. Tarjolla on kuitenkin paljon ennakoivaan palontorjuntaan perustuvia keinoja, sekä tilanteesta ja ympäristöstä riippuvia palonsammutus- ja rajausmenetelmiä. Tässä opinnäytetyössä pyrin nostamaan esille tämänhetkisiä ratkaisuja mahdollisimman monipuolisesti, ajatellen aluksen palonhenkilöstön toimintaa ja sammutusmahdollisuuksia. Jatkotutkimuksissa tulee keskittyä seuraamaan sammutusratkaisujen kehitystä, niin maailmalla kuin suomessakin, sekä akustojen palo- ja käyttöturvallisuuden parantamista. Kaasuautojen kohdalla huomio kannattaa kiinnittää ennakoivaan huoltoon, sekä ennakoivaan vuotojen havaitsemiseen. Nämä edellä mainitut asiat tulevat olemaan varmasti keskeisiä tutkimuskohteita tulevaisuudessa litiumioniakku-käyttöisien ajoneuvojen paloturvallisuudesta puhuttaessa.

LÄHTEET

Battery University. 2019. BU-304a: Safety Concerns with Li-ion. WWW-julkaisu. Saatavilla: https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion [viitattu 15.3.2020].

Carlsson, M. 2020. Study of safety aspects of carriage and charging of electrical vehicles (cars and minor units). Stena Teknik. Swedish shipowner's association. Luottamuksellinen. [viitattu 15.03.2020].

DNV GL. 2019. Rules for classification. WWW-julkaisu. Saatavilla: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnvgl/ru-ship/2019-02/dnvgl-ru-ship-pt6ch5.pdf> [viitattu 17.2.2020].

Electropeadia s.a. Battery and Energy Technologies. Battery Management Systems (BMS). WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.mpoweruk.com/bms.htm> [viitattu 15.03.2020].

Hallikainen, V. 2017. Ajoneuvojen li-ion-akkujen palotutkimus. Metropolia ammattikorkeakoulu. Auto- ja kuljetustekniikka. Insinööriyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/129366/Hallikainen_Ville.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 22.11.2019].

Huttu, I. 2019. Pelastusopisto. Pelastusyksikön ensitoimenpiteitä täydentävät sammutusmenetelmät. Sammutustekniikka. Opetusmateriaali. <https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/2017/04/PETS-sammutustekniikka-lhu.pptx.ppsm> [viitattu 06.02.2020].

IMO. 2019. SR&G. IMO Regulations. MSC.1/Circ.1615. WWW-julkaisu. Saatavilla: [http://shippingregs.org/Portals/2/SecuredDoc/Circulars/MSC.1-Circ.1615-%20-%20Interim%20Guidelines%20For%20Minimizing%20The%20Incidence%20And%20Consequences%20OfFires%20In%20Ro-Ro%20Spaces%20A...%20\(Secretariat\).pdf?ver=2019-07-25-104758-230](http://shippingregs.org/Portals/2/SecuredDoc/Circulars/MSC.1-Circ.1615-%20-%20Interim%20Guidelines%20For%20Minimizing%20The%20Incidence%20And%20Consequences%20OfFires%20In%20Ro-Ro%20Spaces%20A...%20(Secretariat).pdf?ver=2019-07-25-104758-230) [viitattu 8.2.2020].

Joensuu, J. 2009. Katsaus sähköautojen tekniikkaan. Tampereen ammattikorkeakoulu. Auto- ja kuljetustekniikka. Opinnäytetyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://core.ac.uk/download/pdf/37995197.pdf> [viitattu 31.12.2019].

Kanerva, T. 2017. Kaasuautokonversio. Suomen kaasuyhdistyksen seminaari 2017. Esitelmä. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.kaasuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2018/12/Autojen-kaasukonversiot-Tommi-Kanerva.pdf> [viitattu 16.03.2020].

Kangasniemi, T. 2020. Litiumakkujen tulipalot estetään uudella ”ylivuototekniikalla” – akku hajoaa turvallisesti vähitellen. Tekniikka & Talous. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tt/2eb227ef-79b7-4f0d-8fc3-3a246b5b9000?ref=ampparit:2238> [viitattu 15.03.2020].

Keränen, M. 2019. Tesla syttyi tuleen Shanghaissa – nyt syttymisen syy selvisi. Tekniikka & Talous. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/tesla-syttyi-tuleen-shanghaissa-nyt-syttymisen-syy-selvisi/2719331b-720f-4f85-96d0-4e09ff659567> [viitattu 31.12.2019].

Lautkaski, R. 2016. Litiumioniakut autopalossa. Pelastustieto. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/litiumioniakut-autopalossa/#6cf31860> [viitattu 22.1.2020].

Liikennefakta. 2019. Vaihtoehtoiset käyttövoimat. Saatavilla: https://www.liikennefakta.fi/ymparisto/henkiloautot/vaihtoehtoiset_kayttovoimat [viitattu 16.11.2019].

Luukanen, J. 2018. Sähköauton tekniikkaa osa 2: Akun lataaminen. Jokamies. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.jokamies.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-2-akun-lataaminen/> [viitattu 07.02.2020].

Mauno, A. 2015. Räjähdelevät kaasuauto ongelmana Ruotsissa. Kauppalehti. Saatavilla: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/rajahtelevat-kaasuauto-ongelma-ruotsissa/73f235a4-3321-3b0b-bcaf-2ef4e5be2608> [viitattu 1.1.2020].

Motiva. 2019a. Kaasuauto. WWW-julkaisu. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/nain liikut viisaasti/va-litse auto viisaasti/autotyyppi/kaasuauto](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/va-litse_auto_viisaasti/autotyyppi/kaasuauto) [viitattu 8.3.2020].

Motiva. 2019b. Kaasuautot. WWW-julkaisu. Saatavilla: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava liikenne ja liikkuminen/nain liikut viisaasti/va-litse auto viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/kaasuautot](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/va-litse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/kaasuautot) [viitattu 8.3.2020].

Mtvuutiset.fi. 2020. Pohjoismaiden ensimmäinen: Tällainen on palavien sähköautojen sammuttamiseen tehty erikoiskontti. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/pohjoismaiden-ensimmainen-tallinen-on-palavien-sahkoautojen-sammuttamiseen-tehty-erikois-kontti/7705956#gs.vem12q> [viitattu 29.1.2020].

Mykkänen, J. 2016. Matkustaja-autolauttojen paloturvallisuus. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Merenkulun koulutusohjelma. Opinnäytetyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/124603/Mykkanen_Joni.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 2.1.2020].

Mäenpää, L. 2019. Sähkö-, hybridi- ja kaasukäyttöisten henkilöautojen paloturvallisuus matkustaja-autolautalla. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Merenkulun koulutusohjelma. Opinnäytetyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/262061/Maenpaa_Lauri.pdf?sequence=2&isAllowed=y [viitattu 22.11.2019].

Niemi, V. 2018. Sähköautojen tulipaloja ei voi sammuttaa samalla tavalla kuin bensa-autoja – Tämä on palokunnille uusi haaste. Tekniikan maailma. Saatavilla: <https://tekniikanmaailma.fi/sahkoautojen-tulipaloja-ei-voi-sammuttaa-samallatavalla-kuin-bensa-autoja-tama-on-palokunnille-uusi-haaste/> [viitattu 28.11.2019].

Onnettomuustutkintakeskus. 2007. Autokansipalon sammutus ja onnettomuustutkinnan kehittäminen. Tutkintaselostus. Saatavilla: https://turvallisuus-tutkinta.fi/material/attachments/otkes/tutkintaselostukset/fi/vesiliikenneonnettomuuksientutkinta/2007/s22007m_tutkintaselostus/s22007m_tutkintaselostus.pdf [viitattu 15.3.2020].

Puranen, K. 2019. Pelastustieto. Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa. Saatavilla: <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikea-sammuttaa/#6cf31860> [viitattu 16.11.2019].

Repo, H. 2020. Tuleen syttynyt sähköauton akku on vaikea sammuttaa – sytty helposti uudelleen, esimerkkiauto 3 kertaa. Kauppalehti. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/tuleen-syttynyt-sahkoauton-akku-on-vaikea-sammuttaa-syttyy-helposti-uudelleen-esimerkkiauto-3-kertaa/c6526bfd-2d44-4ee5-8808-b55ea92bf3aa> [viitattu 16.1.2020].

Saastamoinen, J. 2019. Varautuminen autokannen tulipaloon. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/263680/Jussi%20Saastamoinen.pdf?sequence=2&isAllowed=y> [viitattu 1.1.2020].

Späth, N. 2016. Enhancing fire safety on Ro-Ro decks. DNV GL. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.dnvgl.com/news/enhancing-fire-safety-on-ro-ro-decks-69059> [viitattu 21.1.2020].

Syke. 2020. Euroopan unionin ilmastopolitiikka ohjaa jäsenmaita. Ilmastopas.fi. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hilinta/-/artikkeli/b82589fa-efc6-41c0-b7fd-0f1233b76c86/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka-ohjaa-jasenmaita.html> [viitattu 7.3.2020].

Tukes. 2018. Opas teollisuuden litiumioniakkujen turvalliseen käyttöön. Koulutusmateriaali. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://tukes.fi/documents/5470659/8237195/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalliseen+k%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n/c5c7fefe79794344ba25ba18a6f9f234/Opas+teollisuuden+litiumioniakkujen+turvalliseen+k%C3%A4ytt%C3%B6%C3%B6n.pdf> [viitattu 07.02.2020].

Tukes. 2019. Teollisuuden litium-ioniakut ja turvallisuus. Opas. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://tukes.fi/documents/5470659/6372809/Teollisuuden+akkuturvallisuusopas/68c21eee-cc0f-8184-bed4-aa71e83140b1/Teollisuuden+akkuturvallisuusopas.pdf> [viitattu 9.3.2020].

Vilmi, T. 2018. www.presto.fi. Litiumioniakkupalot vaativat erilaista sammuttamista. Blogi. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.presto.fi/blogi/litiumakkupalot-vaativat-erilaista-sammuttamista> [viitattu 15.03.2020].

Virtanen, H. 2020. Alustekniikka ja meriympäristö. Liikenne- ja viestintävirasto. Traficom. Sähköpostikeskustelu. [viitattu 12.02.2020].

Virtanen, J. 2020. Markkinoilla jo parissa vuodessa? – Lähes tuhoutumaton akkukeksintö kestää rankaisua loputtomiin. Kauppalehti. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/markkinoilla-jo-parissa-vuodessa-lahes-tuhoutumaton-akkukeksinto-kesta-rankaisua-loputtomiin/185e1a4c-f760-432c-b7a6-cdc152b41b57> [viitattu 16.1.2020].

Vuorela, J. 2015. Hybridi- ja sähköauto, toiminta ja työturvallisuus liikenneonnettomuustilanteessa. Savonia ammattikorkeakoulu. Palopäällystön koulutus. Opinnäytetyö. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/98877/Hybridi%20ja%20sahkoauto%20toiminta%20ja%20tyoturvallisuus%20liikenneonnettomuustilanteessa%20Janne%20Vuorela.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [viitattu 22.11.2019].

Ying, Z. 2018. Fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels. Brandforsk. WWW-julkaisu. Saatavilla: https://www.brandskyddsforeningen.se/globalassets/brandforsk/pdf/rapporter-2018/brandforsk_400_161_report.pdf [viitattu 17.03.2020].

KUVALÄHTEET

Kuva 1 ja 2. Niskala, J. 2017. Sähköautojen tekniset ratkaisut. Kandidiseminaari. Saatavilla: http://www.tut.fi/eee/opetus/Kandiseminaari2017/TEL/Niskala_Jaakko.pptx [viitattu 1.1.2020].

Kuva 3. AFDC. Alternative fuels data center. How do all-electric cars work? Saatavilla: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 4. AFDC. Alternative fuels data center. How do hybrid electric cars work? Saatavilla: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 5. Quora, Krishna. 2017. Will Tesla make an electric bike? Electric bikes will revolutionize urban commuting. Saatavilla: <https://www.quora.com/Will-Tesla-make-an-electric-bike> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 6. Luukkanen, J. 2019. Sähköauton tekniikka osa 4: Akkuvalmistajat. Tyyliniekka. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://tyyliniekka.fi/sahkoauton-tekniikka-osa-4-akkuvalmistajat/> [viitattu 7.2.2020].

Kuva 7. Allen, L. 2019. A look at how lithium ion batteries work. Automotive News. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.autonews.com/shift/look-how-lithium-ion-batteries-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 8. AFDC. Alternative fuels data center. How do natural gas vehicles work? <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-natural-gas-cars-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 9. AFDC. Alternative fuels data center. How Do Liquefied Natural Gas Trucks Work? Saatavilla: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-lng-cars-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 10. AFDC. Alternative fuels data center. How Do Natural Gas Class 8 Trucks Work? Saatavilla: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-natural-gas-class-8-trucks-work> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 11. Puranen, J. 2017. Litiumioniakun toimintaperiaate. WWW-julkaisu. Saatavilla: <http://johdoton.blogs.tamk.fi/2017/05/08/litiumioniakun-toimintaperiaate/> [viitattu 1.1.2020].

Kuva 12. Vilmi, T. 2018. Litiumakkupalot vaativat erilaista sammuttamista. Presto. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.presto.fi/blogi/litiumakkupalot-vaativat-erilaista-sammuttamista> [viitattu 15.3.2020].

Kuvat 13, 14 ja 15. Grøndahl, L. 2019. Beredskabsinfo. Har indsat Nordens første brandslukningscontainer til el-biler. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.beredskabsinfo.dk/brandvaesen/har-indsat-nordens-foerste-brandslukningscontainer-til-el-biler/> [viitattu 15.3.2020].

Kuva 16. CTIF. International association of fire and rescue services. 2018. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.ctif.org/news/lessons-learned-accident-involving-lng-truck> [viitattu 5.2.2020].

Kuva 17. Legendary Videos. Legendary Finds. WWW-julkaisu. Saatavilla: <https://www.legendaryfinds.com/thermal-imaging-lens-makes-drag-racing-look-insanely-cool/> [viitattu 16.3.2020].