

Opinnäytetyö (Turun AMK)

Ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

2023

Miko Riihimäki

SÄHKÖ- JA HYBRIDIAJONEUVOJEN LITIUMIONIAKUSTON PALOTURVALLISUUS

Miko Riihimäki

SÄHKÖ- JA HYBRIDIAJONEUVOJEN LITIUMIONIAKUSTON PALOTURVALLISUUS

Tässä opinnäytetyössä tutustutaan sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytettyyn litiumioni-akkutekniikkaan sekä niiden paloturvallisuuteen. Mediassa sähköautopalot tulevat esiin usein negatiivisessa valossa. Työ tehtiin lisäämään ihmisten tietoisuutta sähköautopaloista ja niiden paloturvallisuudesta. Tämä työ suoritettiin kirjallisuustutkimuksena perehtymällä suomen- ja englanninkieliseen aineistoon aiheesta. Useista eri lähteistä koottiin mahdollisimman laadukas tietoperusta. Muodostetusta tiedosta tehtiin johtopäätelmiä sekä huomioita.

Aluksi työssä käydään läpi Suomessa ensirekisteröityjen ajoneuvojen tilastoja, jonka jälkeen siirrytään tutustumaan tarkemmin litiumioniakkutekniikkaan ja niiden turvallisuusvaatimuksiin Euroopan markkinoille tulevista ajoneuvoista. Seuraavaksi perehdytään sähköautopalon akun syttymiseen johtaviin tekijöihin, akunvalvontajärjestelmän tärkeyteen sekä akun palamisen tuottamiin ongelmakohtiin. Paloturvallisuusluvun lopulla esitetään pelastustoimen välineitä sähköautopaloille, avataan palokaasujen ja sammutusveden haitallisuuksia sekä tutustutaan Suomen liikennevälinepalotilastoihin. Loppuluvussa pohditaan ja kootaan aineiston perusteella muodostuneita päätelmiä.

Työssä huomattiin, että lopulliset litiumioniakunominaisuudet riippuvat siinä käytettävästä akkukemiasta ja niiden suhteista. Akussa käytettävä katodin aktiiviaine vaikuttaa missä lämpötilassa lämpöryntäys tapahtuu. Valinnassa on kuitenkin otettava huomioon muutkin ominaisuudet.

Sähköautopalojen sammuttamiseen on kehitetty erilaisia työkaluja sekä menetelmiä. Sähköautopalot ovat tällä hetkellä harvinaisia Suomessa, koska sähköautot ovat yleistyneet vasta viime vuosina. Oletettavasti palojen määrä tulee kasvamaan lähivuosina ajoneuvokannan muuttuessa enemmän sähköiseen suuntaan.

ASIASANAT:

Sähköauto, hybridiauto, plug-in hybridi, paloturvallisuus, litiumioniakku

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Automotive and Transportation Engineering

2023 | 32 pages

Miko Riihimäki

FIRE SAFETY OF LITHIUM-ION BATTERY FOR ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES

This thesis introduces the lithium-ion battery technology and fire safety used in electric and hybrid vehicles. In the media, electric car fires are often portrayed in a negative light. The work was done to increase people's awareness of electric car fires and their fire safety. This work was conducted as a literature study by familiarizing Finnish and English material on the subject. The database was compiled from several different sources. Conclusions and observations were made from the generated information.

First, the work will review the statistics of vehicles first registered in Finland, after which the thesis moves on to lithium-ion battery technology and their safety requirements for vehicles coming to the European market. Next, the work deals with the factors leading to the battery ignition of an electric car fire, the importance of the battery management system and the problem areas caused by battery burning. At the end of the fire safety chapter, rescue equipment for electric car fires is presented, the harmful effects of fire gases and firewater are opened, and Finnish transport vehicle fire statistics are introduced. In the last chapter, the conclusions formed based on the material are discussed and compiled.

The work showed that the final qualities of a lithium-ion battery depend on the battery chemistry used in it and their ratios. The cathode material used in the battery affects the temperature at thermal runaway. However, other features must also be taken when choosing cathode material.

Different tools and methods have been developed for extinguishing electric car fires. Electric car fires are currently rare in Finland, because electric cars have only become common in recent years. Presumably, the numbers of fires will increase in the next few years as the vehicle fleet changes more in the electric direction.

KEYWORDS:

Electric car, hybrid car, plug-In hybrid, fire safety, lithium-ion

SISÄLTÖ

| | |
|--|-----------|
| KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO | 6 |
| 1 JOHDANTO | 7 |
| 2 RAJAUS | 8 |
| 3 NYKYTILANTEEN KUVAUS | 10 |
| 3.1 Henkilöautojen ensirekisteröinnit Suomessa | 11 |
| 4 TEORIA | 14 |
| 4.1 Litiumioniakuston rakenne ja toiminta | 14 |
| 4.2 Litiumioniakut sähköajoneuvoissa. | 16 |
| 4.3 Sähköauton akun tyyppihyväksyntä vaatimukset | 17 |
| 5 PALOTURVALLISUUS | 19 |
| 5.1 Sähköajoneuvon palamiseen johtavat tekijät | 19 |
| 5.2 Akunvalvontajärjestelmä | 20 |
| 5.3 Ongelmakohtat ja sammutusmahdollisuudet | 21 |
| 5.4 Sähköautopalot Suomessa | 25 |
| 6 POHDINTA | 27 |
| LÄHTEET | 30 |

KUVAT

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Litiumioniakun toiminta purkautuessa. | 16 |
|---|----|

KUVIOT

| | |
|--|----|
| Kuvio 1. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen ensirekisteröinnit vuosina 2015–2022. | 11 |
| Kuvio 2. Bensiini ja diesel henkilöautojen ensirekisteröinnit vuosina 2015-2022. | 12 |
| Kuvio 3. Henkilöautojen ensirekisteröinnit Suomessa 2022. | 13 |

TAULUKOT

| | |
|--|----|
| Taulukko 1. Sammutusvesistä mitattuja pitoisuuksia. | 24 |
| Taulukko 2. Tieliikenneajoneuvojen tulipalot vuosina 2016–2020 | 25 |

KÄYTETYT LYHENTEET JA SANASTO

| | |
|----------------|---|
| C-arvo | Akun valmistajan ilmoittama arvo, millaisella virralla akkua pystytään lataamaan tai purkamaan. |
| Inertia | Massan taipumus vastustaa nopeuden muutoksia, hitaus (Kotimaisten kielten keskus 2023). |
| Latausaste | Akun sisältämän sähköenergian määrä suhteessa sen kapasiteettiin. |
| Lähipäästö | Ilmastolle haitallisia kaasupäästöjä. |
| mΩ | Milliohmi, resistanssin eli sähkövastuksen mittayksikkö. |
| Ominaisenergia | Specific energy, varastoidun energian suhde massaan (Xiong & Shen 2019). |
| ppm | Parts per million, miljoonasosa. Käytetään haitallisten pitoisuuksien ilmoittamiseen. |
| Wh/kg | Wattituntia per kilogramma, ominaisenergian yksikkö. |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä sähkö- ja hybridaajoneuvojen litiumioni-akustoiden paloturvallisuuteen. Työssä pohditaan sähköautopalon aiheuttamia vaaroja ympäristölle, kiinteistöille ja pelastustoimelle. Päämääränä on luoda tietoisuutta laajasti käytössä olevien litiumioniakkujen ongelmista etenkin sähköautojen näkökulmasta.

Työssä käydään läpi sähköllä ladattavien henkilöautojen ensirekisteröintitilastoja sekä tutustutaan sähköautojen akkukemiaan. Lisäksi tarkastellaan valmistajien menetelmiä, miten akuston ylikuumentumisen voi estää. Lopuksi perehdytään akkupaloihin ja niiden sammutustoimenpiteisiin.

Opinnäytetyö on toteutettu kirjallisuustutkimuksena. Aikomuksena on koota olemassa olevalla tiedolla laaja tietoperusta. Aihetta on tutkittu vähän Suomessa, joten materiaalia luotettavista lähteistä on niukasti tarjolla. Lähdeaineistona on käytetty aiheeseen liittyvää kirjallisuutta, uutisartikkeleja sekä valmistajien ohjeistuksia. Kokoon kerätystä tiedosta on muodostunut päätelmiä, joita avataan lukijalle työn lopussa.

Työllä halutaan tuoda julki tietoa litiumioniakustoiden paloturvallisuudesta mahdollisimman selkeästi kerrottuna. Aiheeseen liittyvää suomenkielistä kirjallisuutta löytyy vielä niukasti. Ulkomailla aihetta on käsitelty enemmän. Ajoneuvokanta muuttuu nopeasti, sillä fossiiliset polttoaineet pyritään muuttamaan uusiutuviksi energiamuodoiksi. Tämän seurauksena sähköajoneuvot yleistyvät.

Työn aihe valikoitui ajankohtaisuutensa vuoksi. Maailmanlaajuisesti autokanta on tullut murrokseen. Perinteisten polttomoottorillisten ajoneuvojen kysyntä on vähenemässä sekä vastaavasti sähköajoneuvojen kysyntä on siirtynyt kasvuun. Työssä keskitytään Suomen ajoneuvokantaan. Tiukentuneet päästönormit, ympäristötietoisuus ja autoilun kohonneet kustannukset ovat johtaneet siihen, että yhä useampi autoilija valitsee ajoneuvonsa käyttövoimaksi sähköä. Sähköisten ajoneuvojen lisääntyminen tulisi ottaa huomioon myös kaupunkisuunnittelussa sekä mahdollisesti myös lainsäädännössä.

2 RAJAUS

Aihe on laaja, mutta sitä haluttiin rajata mahdollisimman tarkasti, jottei työ laajene liian suureksi. Ennen työn varsinaista aloittamista suoritettiin asiantuntijanhaastattelu, josta saatiin hyviä vinkkejä miltä kannalta työtä kannattaa lähestyä. Lisäksi haastattelussa tuli esille paljon käytännön tietoa, jota pystyttiin lähtemään tutkimaan tarkemmin.

Työssä perehdytään enimmäkseen sähkö- ja hybridikäyttöisiin henkilöautoihin. Ei pidä unohtaa, että myös pakettiautoja, kuorma-autoja sekä linja-autoja löytyy sähkö- tai hybriditekniikalla. Näissä akustot ovat suurempia kuin henkilöautoissa. Ensirekisteröintitilastoissa ilmoitetut bensiini- ja dieselajoneuvojen kokonaismäärät sisältävät myös hybriditekniikkaa, jossa osassa on käytössä myös pieni korkeajännitteinen litiumioniakku. Käsiteltävät rekisteröintitilastot koskevat Suomessa 2015–2022 ensirekisteröityjä henkilöautoja.

Litiumioniakkukemioita ja niiden variaatioita on valtava määrä erilaisia, joten niiden ominaisuuksien läpikäymiseen ei yksi opinnäytetyö riittäisi. Akun lopulliset ominaisuudet riippuvat käytettävistä aktiiviaineista sekä niiden suhteista. Litiumioniakut saattavat olla jopa useamman akkukemian muunnelmia. Akkukemioissa esitetyt ominaisuudet ovat tyypillisiä piirteitä kyseiselle akkukemialle. Eri julkaisuissa annetut arvot poikkesivat myös suuresti toisistaan. Akkujen sekä auton valmistajat eivät myöskään usein kerro kovinkaan tarkasti lopullisesta akusta ja siinä käytettävistä tekniikoista.

Läpikäytävät sähköauton akun tyyppihyväksyntävaatimukset ovat vain minimivaatimuksia. Usein autonvalmistajat tekevät enemmän testejä turvallisen ajoneuvon tuomiseksi markkinoille.

Akunjäähdytykseen löytyy useita menetelmiä kuten puhallin- ja nestekiertojäähdytys tai siihen on saatettu käyttää samanlaista tekniikkaa kuin auton ilmastoinnissa. Akkupaketeissa saattaa olla myös erilaisia ratkaisuja kennon sisäisen paineen poistamiseksi. Näitä ei käydä työssä sen tarkemmin läpi.

Akkupalon sammuttamiseen käytettävään sammutusveteen muodostuu useita myrkyllisiä kemikaaleja. Muodostuvat aineet riippuvat käytettävästä akkukemiasta. Työhön on poimittu ne aineet, joille löytyi raja-arvot viemäriin johdettaville jätevesille.

Palotilastot käsittelevät Suomessa tapahtuneita tieliikennevälinepaloja. Niihin kuuluvat henkilöautot, pakettiautot, raskasliikenne, työkoneet, peräkärret, kaksipyöräiset ajoneuvot sekä asuntoautot ja -vaunut.

3 NYKYTILANTEEN KUVAUS

Vuonna 2021 heinäkuussa Euroopan komissio hyväksyi lainsäädäntöehdotuksen koskien ilmastoneutraalisuuden tavoittamista vuoteen 2050 mennessä. Välitavoitteena on pienentää kasvihuonepäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoteen 1990. Ehdotus sisälsi päästötavoitteet, joilla pyritään vähentämään uusien henkilö- ja pakettiautojen hiilidioksidipäästöjä. (Euroopan komissio 2023)

Vuoteen 2025 mennessä uusien henkilö- ja pakettiautojen päästöt tulisi pienentyä entisestään 15 %. Vuoteen 2030 mennessä henkilöautojen päästörajaa kiristetään 55 % ja pakettiautojen 50 %. Tavoitteena on täysin päästöttömät uudet henkilö- ja pakettiautot vuonna 2035 mennessä. Jotta valmistajat noudattaisivat tavoitteita EU on määrännyt liikapäästömaksun. Autonvalmistaja joutuu korvaamaan Euroopan Unionille jokaisesta uudesta autosta 95 € g/km, joka ylittää annetun päästötavoitteen. Jos auton valmistajat eivät pääse EU:n asettamiin päästötavoitteisiin, voi siitä seurata merkittäviä taloudellisia haittoja autonvalmistajalle. (Euroopan komissio 2023)

Suomi haluaa olla ilmastoasioissa etusijalla. Suomen ilmastotavoitteena onkin hallitusohjelman 2019 mukaan, että Suomi on hiilineutraali ja ensimmäinen fossiilivapaa yhteiskunta vuoteen 2035 mennessä (Ympäristöministeriö 2022). Edustakuntavaalien 2023 jälkeen hallitusneuvotteluissa yhdeksi vaikeimmista kysymyksistä nousi ilmastotavoitteet ja niissä pysyminen. Hallituksen muodostaja Petteri Orpo ei kuitenkaan ollut valmis joustamaan pyrkimyksestä päästä hiilineutraaliksi aiemman tavoitteen mukaan. (Aaltonen 2023) Yhtenä osana ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi autoilu ja sen päästöt tulevat olemaan oleellisessa osassa.

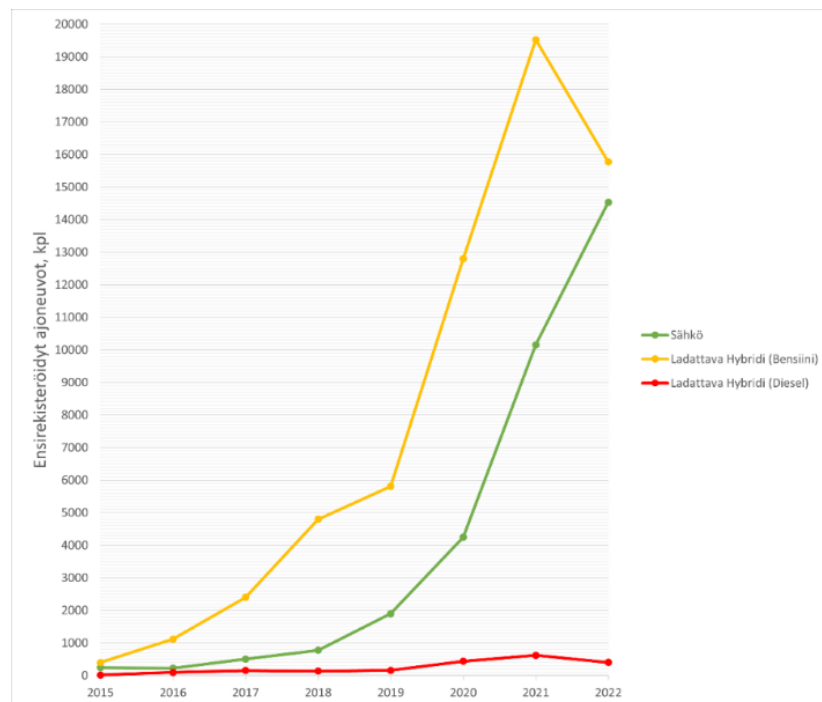
Suomen vanhaa autokantaa tulisi uudistaa, jotta henkilöautoilun lähipäästöjä kyettäisiin vähentämään. Kuluttajia tulisi motivoida siirtymään vähäpäästöisimpiin ajoneuvoihin. Haja-asutusalueilla, joissa on pitkiä välimatkoja, sähköauton toimintamatka voi syntyä ongelmaksi. Tällaisessa tilanteessa plug-in hybridi saattaisi olla varteen otettava vaihtoehto. Ajoneuvokanta elää tällä hetkellä murroksen aikoja.

3.1 Henkilöautojen ensirekisteröinnit Suomessa

Menneen seitsemän vuoden aikana Suomessa ensirekisteröityjen plug-in hybridien sekä täyssähköautojen määrä on kasvanut merkittävästi. Vuonna 2015 bensiinikäyttöisiä plug-in hybridejä rekisteröintiin vain 399 kappaletta (Kuvio 1). Vuoteen 2021 mennessä kyseinen luku oli noussut melkein 50 kertaiseksi eli 19 524 ajoneuvoon. (Traficom 2023)

Ladattavien dieselhybridien myynti taas on ollut varsin maltillista muihin käyttövoimiin verrattuna. Vuonna 2015 ensirekisteröintiin vain 15 ladattavaa dieselhybridiä. Määrä kuitenkin kasvoi vuoteen 2021 asti, jolloin autoja ensirekisteröitiin yhteensä 620. Tämän jälkeen vuonna 2022 plug-in hybridien ensirekisteröinnit kuitenkin laskivat vuoden 2020 tasolle. (Traficom 2023)

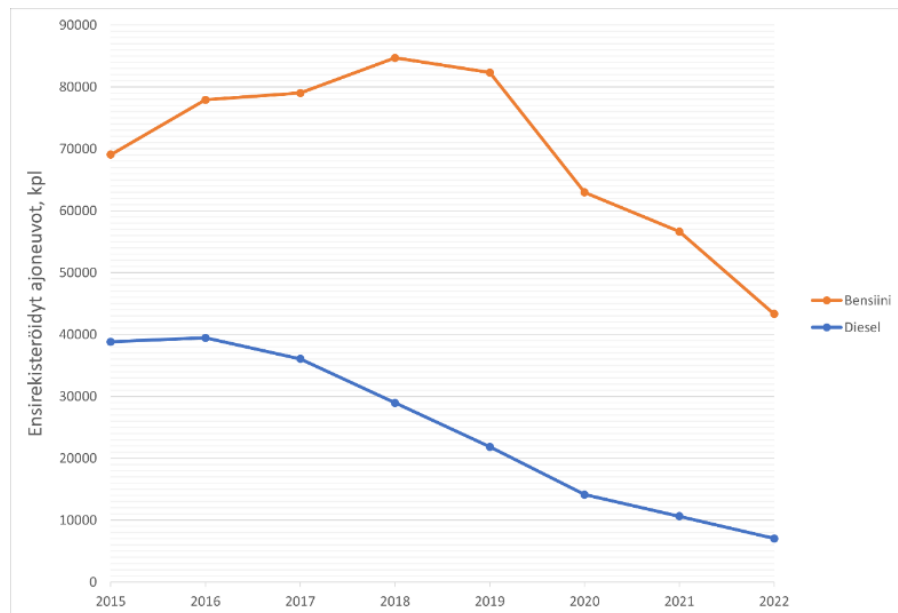
Seitsemässä vuodessa täyssähköautojen ensirekisteröinnit ovat lähes 60 kertaistuneet. Vuonna 2015 niitä rekisteröitiin 243 ja vuonna 2022 määrä lisääntyi 14 531 kappaleeseen. (Traficom 2023)



Kuvio 1. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen ensirekisteröinnit vuosina 2015–2022 (Traficom 2023).

Vielä vuoteen 2018 asti bensiinikäyttöisten henkilöautojen ensirekisteröinnit ovat olleet nousussa. Kyseisenä vuonna niitä ensirekisteröitiin 84 700 kappaletta (Kuvio 2). Tämän jälkeen luku on kuitenkin kääntynyt laskuun ja seuraavana vuonna 2019 bensiiniautoja myytiin 2 366 vähemmän edeltävään vuoteen verrattuna. Vuoteen 2022 mennessä ensirekisteröinnit olivat tippuneet jo 43 329 ajoneuvoon. (Traficom 2023)

Laskusuuntaus näkyy myös dieselkäyttöisten henkilöautojen ensirekisteröinneissä, jotka ovat lähteneet tasaiseen laskuun vuonna 2017. Uusia diesel autoja ensirekisteröitiin tuolloin 39 463 kappaletta. Vuoteen 2022 mennessä dieselautojen ensirekisteröinti on romahtanut 7 046 kappaleeseen. Diesel autojen ensirekisteröinnit eivät ole olleet yhtä alhaisissa lukemissa koko 2000-luvulla kuin tällä hetkellä. (Traficom 2023)

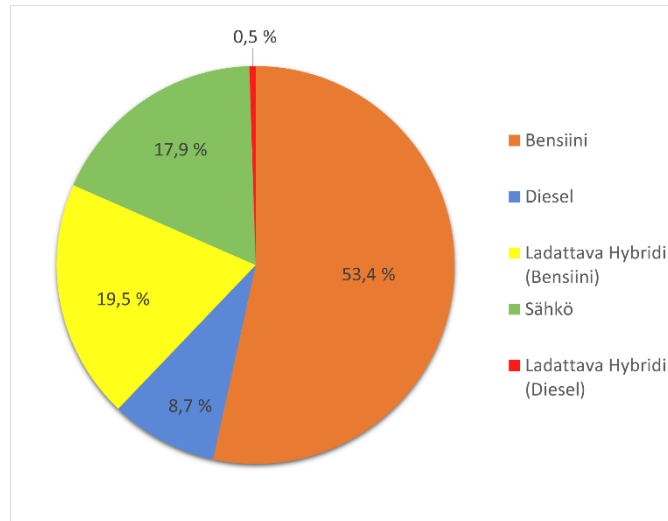


Kuvio 2. Bensiini ja diesel henkilöautojen ensirekisteröinnit vuosina 2015–2022 (Traficom 2023).

Vuonna 2022 ensirekisteröidyistä henkilöautoista yli puolet on käyttövoimaltaan bensiinikäyttöisiä (Kuvio 3). Plug-in hybridien sekä täyssähköautojen yhteenlaskettu määrä ensirekisteröineissä vuonna 2015 on ollut vain 657 kappaletta. Vuonna 2022 kyseinen määrä on noussut jo 30 707 ajoneuvoon. (Trafi 2023) Voidaan siis todeta kysynnän nousseen räjähdysmäisesti seitsemässä vuodessa.

Houkutus hyödyntää sähköä käyttövoimana kasvaa, kun perinteisten polttoaineiden hinnat nousevat. Lisäksi vuodesta 2022 alkaen uusista sähköautoista ei ole tarvinnut

maksaa oston yhteydessä maksettavaa autoveroa (Verohallinto 2023). Fossiilivapaa polttoaine sekä lähipäästöttömät kilometrit herättävät ihmisten kiinnostusta vihreämpää tulevaisuutta ajatellessa. Kaupungissa asuvalle täyssähköauton toimintamatka on usein riittävä ja on näin ollen varteenotettava vaihtoehto.



Kuvio 3. Henkilöautojen ensirekisteröinnit Suomessa 2022 (Traficom 2023).

4 TEORIA

Litiumioniakkujen käyttö on yleistynyt räjähdysmäisesti viime vuosina niin autoteollisuudessa sekä kulutuselektronikassa. Nykypäivänä autovalmistajat käyttävät litiumioniakkuja niin sähköhybridiajoneuvoissa, plug-in-hybrideissä kuin täyssähköautoissakin. Akkujen merkittävimpänä etuna on suuri energiatiheys ja erinomainen teho/painosuhte, jotka mahdollistavat akuston kevyemmän rakenteen sekä pidemmän käyttöiän verrattuna perinteisiin akkutyyppeihin.

4.1 Litiumioniakuston rakenne ja toiminta

Litiumioniakun rakenteen muodostaa katodi, anodi, elektrolyyttiliuos sekä separaattori. Katodi eli positiivinen elektrodi koostuu aktiiviaineesta sekä kuparisesta virrankerääjästä. Anodin eli negatiivisen elektrodin muodostaa aktiiviaine ja alumiininen virrankerääjä. Separaattori eli erotin estää katodin ja anodin fyysisen kontaktin, mutta päästää lävitseen litiumionit. Litiumioniakuista on monia eri variaatioita riippuen siitä mitä katodi- ja anodimateriaalia käytetään. Anodin aktiiviaine on usein grafiittia, pois lukien litium-titanaatti akut, joissa aktiiviaine on titanaattia. Akussa käytettävä akkukemia nimetään katodin aktiiviaineen mukaan. (Battery University 2022)

Yleisimmät katodin aktiiviaineet litiumioniakuissa:

- litium-nikkelimangaanikobolttioksidi (NMC)
- litium-mangaanioksidi (LMO)
- litium-nikkelikobolttialumiinioksidi (NCA)
- litium-rautafosfaatti (LFP)
- litium-kobolttidioksidi (LCO).

Litium-nikkelimangaanikobolttioksidi on johtava katodimateriaali sähköautojen akuissa. Ominaisenergialtaan NMC-akut ovat 150–220 Wh/kg. Lämpöryntäys tapahtuu 210 asteissa. Akkutyypin vahvuuksia on hyvä lämmönkestävyys, suuri ominaisenergia, syklinkesto sekä kokonaissuorituskyky. NMC-akuilla ei ole selvää heikkoutta, mutta niissä käytettävä koboltti on varsin kallista, joten koboltin osuus pyritään pitämään mahdollisimman matalana. (Battery University 2021)

Litium-mangaanioksidiaikut ovat ominaisenergialtaan 100–150 Wh/kg. Lämpöryntäys tapahtuu vasta 250 asteessa. Vahvuuksia LMO-akuilla on edulliset valmistuskustannukset, alhainen sisäinen resistanssi sekä turvallisuus. Heikkoutena on matala syklinkesto. LMO- sekä NMC-akkukemioita sekoitetaan usein keskenään, jotta saavutetaan kummankin akkukemian parhaimmat puolet. Tällaisia yhdistettyjä akkukemioita on käytetty mm. Chevrolet Voltissa sekä Nissan Leafissä. (Battery University 2021)

Litium-nikkelikobolttialumiinioksidia pidetään nousevana katodimateriaalina. Ominaisenergialtaan NCA-akut ovat 200–260 Wh/kg. Tulevaisuudessa akkutyypin ennustetaan saavuttavan jopa 300 Wh/kg ominaisenergian. Lämpöryntäys tapahtuu 150 asteessa. NCA-akkujen vahvuus on korkea ominaisenergia, mutta sen heikkoudet ovat korkea hinta, lämpöryntäysalttius sekä se on herkkä ylilataamiselle. Panasonic käyttää NCA:ta katodimateriaalinaan Teslalle tuottamissaan akuissa. (Battery University 2021)

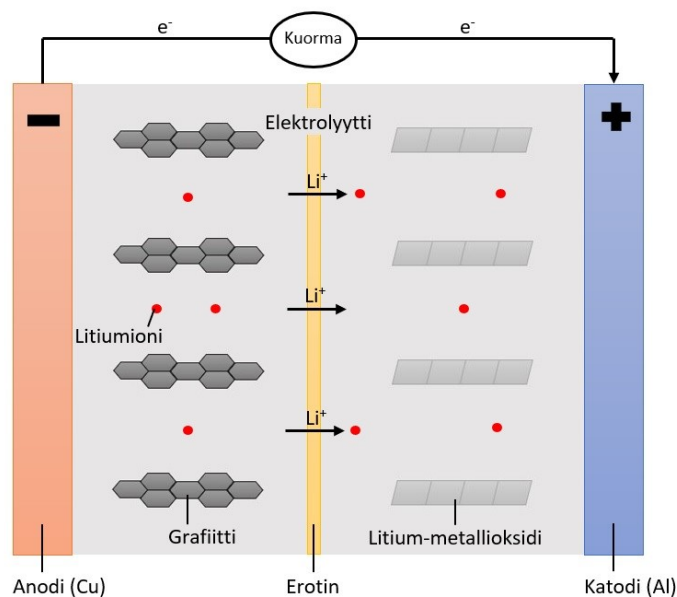
Litium-rautafosfaattiakkujen suurimpia etuja ovat pitkä käyttöikä sekä terminen stabiilius. Ominaisenergialtaan LFP-akut ovat 90–120 Wh/kg. Lämpöryntäys tapahtuu vasta kun saavutetaan 270 astetta. Tämä tekee akkutyypistä yhden turvallisimmista. Tällä hetkellä niiden käyttö autoteollisuudessa on kuitenkin vähäistä. Akkutyypin on erityisen herkkä kylmyydelle. (Battery University 2021) Teslan omistaja Elon Musk uskoo, että akkutyypin on kuitenkin tarpeeksi kehittynyt ja aikoo tulevaisuudessa käyttää enemmän LFP-akkuja Teslojen valmistuksessa (Musk 2021). Litium-rautafosfaattiakussa ei synny liekkipaloa vaan, se ainoastaan savuaa lämpöryntäyksen edetessä (Andersson 2021).

Litium-kobolttidioksidia käytetään enimmäkseen elektroniikkatuotteiden akuissa kuten puhelimissa, kannettavissa tietokoneissa, varavirtalähteissä sekä kameroissa. Ominaisenergialtaan LCO-akut ovat 150-240Wh/kg. Lämpöryntäys tapahtuu 150 asteessa. Katodimateriaalina litiumkobolttidioksidi on nykypäivänä melko vanhentunutta teknologiaa ja sitä käytetään yhä vähemmän ja vähemmän koboltin markkinahinnan vuoksi. Toisena syynä on muiden akkutyypin kehitys. Sitä löytyy kuitenkin paljon vielä vanhemmissa elektroniikka laitteista. (Battery University 2021)

Litium-titanaattiakut eroavat toisista akkutyypeistä sillä, että anodi valmistetaan titanaatista grafiitin sijasta. Katodina tyypillisemmin käytetään litium-mangaanioksidia tai litium-nikkelimanganikobolttioksidia. LTO-akut toimivat erinomaisesti myös pakkasella ja voivat saavuttaa jopa 80 % varauksen -30 asteessa. Akkutyypille on myös ominaista pitkä käyttöikä ja se kestääkin 3000–7000 latauskertaa. Heikkouksena LTO-akulla on sen pieni ominaisenergia 50–80 Wh/kg sekä varsin korkeat valmistuskustannukset. Litium-

titaaniakkuja pidetään myös yhtenä turvallisimpana akkutyypinä, koska se ei ole altis lämpökarkaamiselle. Akkutyyppejä on käytetty mm. Honda Fit täyssähköversiossa. (Battery University 2022)

Kaikkia akkutyyppejä yhdistää samanlainen toimintaperiaate. Litiumionit liikkuvat positiivisen ja negatiivisen elektrodin välillä. Akun latautuessa katodin aktiivina toimiva litiummetallioksidi luovuttaa positiivisia litiumioneita erottimen läpi anodin aktiivina toimivalle grafiitille. Akun purkautuessa litiumionit liikkuvat anodilta katodille (Kuva 1). (Battery University 2022)



Kuva 1. Litiumioniakun toiminta purkautuessa.

4.2 Litiumioniakut sähköajoneuvoissa.

Sähköauton ajoakusto koostuu useasta toisiinsa kytketyistä akkumoduuleista muodostaen akkupaketin. Moduulit sisältävät akkukennoja, joiden määrä ja tyyppi vaihtelee valmistajasta riippuen. Akut ovat isoja ja painavia mikä pitää ottaa huomioon ajoneuvon suunnittelussa ja akuston sijoittamisessa. Täyssähköautoissa akkupaketit ovat luonnollisesti suurempia kuin hybridi ajoneuvoissa, joten niissä akusto on sijoitettu usein ajoneuvon alustaan. Hybridi autoissa akkupaketit ovat pienempiä, joten ne voidaan sijoittaa takamatkustajien penkin alle tai takakontin pohjaan.

4.3 Sähköauton akun tyyppihyväksyntä vaatimukset

Euroopan markkinoille tulevat sähköautojen akut on täytettävä Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission laatimat turvallisuusvaatimukset. Kyseiset vaatimukset on esitetty säännössä numero 100. Säännössä on laadittu kymmen erilaista testiä, jotka akkujen tulee läpäistä. Vaaditut testit akun hyväksyntään ovat tärinätesti, lämmönvaihtelu- ja lämpöshokkitesti, mekaaniset isku- ja puristustestit, tulenkestävyydesti, ulkoisen oikosulun suojaustesti, yllätauksensuojaustesti, ylipurkautumissuojaustesti, ylikuumenemissuojaustesti sekä ylivirtasuojatesti. Edellä mainitut testit ovat minimivaatimuksia akuille, jotta niitä voidaan käyttää ajoneuvossa. (UNECE 2022)

Tärinätestin tarkoituksena on varmistaa akun turvallisuus tärisevässä ympäristössä. Kun ajoneuvo liikkuu, akku tulee kokemaan tärinää tien epätasaisuuksista johtuen. Läpäistäkseen testi akun tulee kestää tietyn suuruista tärinää kolmen tunnin ajan. Testi suoritetaan 15 minuutin sykleissä yhteensä 12 kertaa. (UNECE 2022)

Lämmönvaihtelu- ja lämpöshokkitesti takaa akun kestävyden äkillisissä lämpötila muutoksissa. Testissä akkua pidetään 60 asteen lämpötilassa minimissään kuusi tuntia, jonka jälkeen akkua säilytetään -40 asteessa vähintään kuuden tunnin ajan. Lämpötilan muuttamiseen tässä välissä on aikaa 30 minuuttia. Testi suoritetaan yhteensä viisi kertaa. (UNECE 2022)

Mekaanisessa iskutestissä testataan kolaritilanteessa esiintyvää inertiakuormitusta. Testissä akkua kiihdytetään tai hidastetaan määritettyjen kiihtyvyykäyrien mukaisesti. Testiarvot riippuvat ajoneuvotyypistä. Testi päättyy tunninmittaiseen tarkkailujaksoon testausympäristössä. (UNECE 2022)

Mekaaninen puristustesti todentaa akun kestävyden kolaritilanteessa, jossa akkuun saattaa kohdistua puristuskuormitusta. Testissä akkua puristetaan murskauslevyllä 100–105 kN voimalla vähintään 100 ms ajan. (UNECE 2022)

Tulenkestävyydestissä varmistetaan, että ajoneuvon kuljettajalla ja matkustajilla on riittävästi aikaa pelastautua ajoneuvosta ulkopuolisesta tulipalosta johtuen. Testin ensimmäisessä vaiheessa akkua altistetaan kolmen metrin etäisyydeltä bensiinipalolle 70 sekunnin ajan. Toisessa vaiheessa palo siirretään akun alle. Minuutin kestävää paloa vaimennetaan metalliritilällä. Palotestin jälkeen akkua tarkkaillaan ja annetaan jäähtyä ympäristön kanssa samaan lämpötilaan tai vähintään kolme tuntia. (UNECE 2022)

Ulkoisen oikosulunsuojaustentii selvittää oikosulkusuojauksen oikeanlaisen toiminnan. Suojauksen tehtävänä on rajoittaa tai keskeyttää oikosulkuvirta. Testi toteutetaan kytke-mällä akun negatiivinen ja positiivinen liitin oikosulkuun. Johtimen vastus saa olla korkeintaan 5 mΩ. Oikosulkutilannetta jatketaan, kunnes suojaustoiminto rajoittaa tai katkaisee oikosulkuvirran. (UNECE 2022)

Ylilatauksensuojaustesti mittaa ylilataussuojauksen toimivuutta. Testissä akkua lada-taan vähintään $\frac{1}{3}$ C latausvirralla, mutta ei ylitetä valmistajan määrittämää maksimivirtaa. Akkua ladataan, kunnes se automaattisesti rajoittaa tai keskeyttää latauksen. Jos edellä mainitut toiminnot epäonnistuvat, akkua ladataan kunnes se on kaksi kertaa oman ni-melliskapasiteettinsa. (UNECE 2022)

Ylipurkautumissuojatestissä akkua puretaan vähintään $\frac{1}{3}$ C purkuvirralla kuitenkin ylittämättä valmistajan määrittämää maksimivirtaa. Akkua puretaan, kunnes se auto-maattisesti rajoittaa tai keskeyttää latauksen. Jos edellä mainitut toiminnot epäonnistu-vat, purkausta jatketaan, kunnes akku on saavuttanut 25 % nimellisjännitetasostaan. (UNECE 2022)

Ylikuumenemissuojatestissä tutkitaan suojauksen toimivuus akun sisäisen kuumenemi-sen estämiseksi ladattaessa tai purettaessa akkua. Testissä akku sijoitetaan uuniin, jonka lämpötilaa nostetaan asteittain ennalta määriteltyyn lämpötilaan. Akkua ladataan ja puretaan mahdollisimman nopeasti, jotta saadaan sen kennosto lämpenemään. Testiä jatketaan, kunnes akku alkaa rajoittamaan tai estämään latausta ja purkausta lämmön-nousun estämiseksi. (UNECE 2022)

Ylivirtasuojatestin tehtävä on valvoa ylivirtasuojan toiminta latauksen aikana. Testi aloi-tetaan lataamalla akkua valmistajan ilmoittamalla normaalilla latausvirralla, jonka jälkeen latausvirtaa nostetaan ennalta määrättyyn ylivirtatasoon. Latausta jatketaan, kunnes yli-virtasuoja katkaisee latauksen. Testi päättyy tunnin kestävään tarkkailujaksoon. (UNECE 2022)

5 PALOTURVALLISUUS

Sähköautojen suosion kasvaessa Suomessa ja muualla maailmassa on syytä huomioida myös paloturvallisuus. Paloturvallisuuden näkökulmasta sähköauton suurin ongelma-kohta on sen akusto. Litiumioniakulla varustetun ajoneuvon syttyessä palamaan ja palon edetessä akustoon, on tilanne hankalasti hallittava. Palava akku tuottaa itse kaikki palamisen edellytykset: riittävän korkean lämpötilan, hapen sekä palavan aineen. Akusto on usein sijoitettu ajoneuvon siten, että se on hankalasti saavutettavissa. Palava akku tuottaa myös suuren määrän hengelle vaarallisia kaasuja. Kerran sammutettu litiumioniakku voi syttyä myös uudelleen palamaan itsestään.

5.1 Sähköajoneuvon palamiseen johtavat tekijät

Teknologian tutkimuskeskus VTT:n selvityksen mukaan sähköautopalon todennäköisyys on 20 kertaa pienempi kuin perinteisen polttomoottorillisen ajoneuvon. Syttymissyitä voi olla monia, mutta suurimman huolen tuottaa sähköauton akusto. Litiumioniakku on itsestään turvallinen, mutta ulkoisen tekijän seurauksena se voi syttyä palamaan. (Teknologian tutkimuskeskus VTT 2020)

Litiumioniakkupaloista puhuttaessa oleellinen termi on lämpöryntäys, jota kutsutaan myös nimellä terminen karkaaminen. Lämpöryntäykseksi kutsutaan reaktiota, jossa järjestelmän lämmön kohoaminen johtaa lämmöntuotannon kasvuun ja hallitsemattomaan lämpötilan nousuun. Akkukennossa asteiden nouseminen aiheuttaa elektrolyytin höyrystymisen ja paineen kasvun kennossa. Lämmön jatkaessa nousua separaattori sulaa ja aiheuttaa anodin ja katodin välisen kennon sisäisen oikosulun. Lämpötilan kasvaessa entisestään katodi hajoaa ja muodostaa palamisreaktioon vaadittavaa happea. Lämpöryntäyksen seurauksena akku tuottaa kaiken palamisen edellytykset. (Pistoia 2014)

Lämpöryntäyksen aiheuttavat tekijät:

- akkukennon sisäinen tai ulkoinen oikosulku
- ylilataaminen ja -purkautuminen
- lämmönnousu
- mekaaninen vaurioituminen.

Akuston ulkoinen oikosulku voi syntyä kuin akun navat kytkeytyvät suunnittelemattomasti toisiinsa. Ulkoinen oikosulku voi muodostua useasta eri tekijästä. Esimerkiksi ulkoisesta iskusta tai muodon muutoksesta, veteen upotuksesta, korroosiosta tai äkillisestä sähköiskusta huollon aikana. Oikosulusta johtuen akuston lämpötila kohoaa huomattavasti ja pahimmassa tapauksessa johtaa lämpöryntäykseen. (Bisschop ym. 2019)

Litiumioniakut kykenevät ottamaan vastaan tietyn määrän virtaa tietyssä ajassa. Akuston liian nopea lataaminen tai sen ylilataaminen aiheuttavat akuston tehon heikkenemistä, ylikuumentumista tai jopa kennoston separaattorin hajoamisen. Ylilatausta voi tapahtua silloin kun akustonvalvontajärjestelmä tunnistaa jännitteen virheellisesti, laturi rikkoutuu tai lataukseen käytettävä laturi on vääränlainen. (Bisschop ym. 2019)

Akun purkautuessa yksittäisen kennon jännitteen pudotessa liian matalaksi, aiheuttaa se akustossa kemiallisen reaktion. Kuparista valmistettu ohut kerros anodin ympärillä alkaa hapettumaan, jolloin kupari-ionit liukenevat elektrolyyttiin. Kupari-ionit saattavat lävistää erottimen ja kiinnittyä katodiin. Tarpeeksi monta kertaa toistuva reaktio synnyttää akustossa sisäisen oikosulun. (Bisschop ym. 2019)

Kennon lämpeneminen voi johtua edellä mainituista syistä, viereisen akkukennon lämpöryntäyksestä, tulipalosta tai akun jäähdystekniikan rikkoutumisesta. Akustolle haitallista mekaanista vaurioitumista tai puristumista voi tapahtua mm. kolaritilanteessa.

5.2 Akunvalvontajärjestelmä

Accunvalvontajärjestelmä on tarpeellinen osa akuston oikean tyyppisen toiminnan sekä turvallisuuden varmistamiseksi. Järjestelmä hallitsee sadoista tuhansiin yksittäisiä sarjaan ja rinnan kytkettyjä akkukennoja. Liiallinen virta sekä vääränlainen akuston lämpötila alentavat sen tehokkuutta ja johtaa turvallisuusongelmiin.

Accuvalvontajärjestelmän tärkeimmät tehtävät:

- hallita akuston purkaus- ja latausvirtaa
- tarkkailla kennojen jännitettä
- optimoida energiankulutus
- valvoa ja säätää akuston lämpötilaa.

Sähköautoa ladattaessa valvontajärjestelmä tarkkailee yksittäisten kennojen jännitettä ja pysäyttää latauksen kennojen saavuttaessa tietyn jännitteen. Näin estetään akuston

ylilataus. Valvontajärjestelmä säättää akun latausta alenevalla latausvirralla. Akun varaus ollessa pienempi ladataan sitä suuremmalla virralla. Kun varaus lähestyy maksimia, hallintajärjestelmä alentaa latausvirtaa. (Andrea 2010)

Akuston purkautuessa ja sen lähentyessä varauksen alarajaa alkaa hallintajärjestelmä rajoittamaan purkausvirtaa mm. alentamalla moottorin vääntömomenttia. Liian alhainen jännite vaurioittaa kennoja, joten hallintajärjestelmä estää alarajan ylittämisen pysäyttämällä purkausvirran. (Andrea 2010)

Akustonhallintajärjestelmä säättää myös akuston lämpötilaa. Ladattaessa matalissa lämpötiloissa hallintajärjestelmä ohjaa akuston lämmitystä minimi käyttölämpötilalle. Akuston lämpötilan noustessa hallintajärjestelmä säättää akuston jäähtymistä estääkseen sen nousemisen yli maksimi käyttölämpötilan. (Andrea 2010)

5.3 Ongelmakohdat ja sammutusmahdollisuudet

Tulipalon sammuttaminen perustuu siihen, että poistetaan yksi kolmesta palamisreaktion edellytyksestä. Yleensä sammuttaminen tapahtuu joko tukahduttamalla palo tai jäähdyttämällä se. Suomen Palopäälystöliitto on laatinut toimintamallit sähköautopaloihin. Niistä selviää, että sähköautopalon sammuttamiseen käytettävät toimenpiteet poikkeavat polttomoottorillisesta ajoneuvosta vain, jos palo on edennyt akustoon. Toimintamallissa esitetään myös arvio siitä, että paloteho olisi sähköautolla polttomoottorillista ajoneuvoa pienempi, riippuen akun latausasteesta. Koska palava akku tuottaa itse palamiseen vaadittavaa hapetta ja lämpöä, on sen tukahduttaminen hankalaa. Näin ollen toimivaksi ratkaisuksi on todettu akustonjäähdyttäminen vedellä. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Autovalmistajat julkaisevat pelastustoimea varten mallikohtaisen pelastusoppaan (Emergency Response Guide), mistä selviää mm. miten ajoneuvo saadaan jännitteettömäksi, oikeat oppiset sammutusmenetelmät sekä turvatyynyjen sijainnit. Ilmoitetut sammutusmenetelmä ohjeistukset poikkeavat toisistaan.

Tesla Model 3 oppaassa kerrotaan, että akuston jäähdyttäminen vaatii 11 000–30 000 litraa vettä kohdistettuna suoraan akkuun. Sammuttamisen voi tarvittaessa aloittaa hiilidioksidi- ja jauhesammuttimella siihen asti, kunnes vettä on saatavilla. Sammutusvaahdon käyttöä tai ajoneuvon upottamista säiliöön ei suositella. Uudelleen syttymisriskin

takia Tesla ohjeistaa vaurioituneen akun säilyttämistä ulkotiloissa 15 metrin etäisyydellä muusta palavasta materiaalista. (Tesla 2023)

Plug-in hybridi Chevrolet Voltin ohjeistus tulipalotilanteeseen on suppeampi. Ohjeistuksessa sanotaan, että palava akku ei räjähdä. Tarpeeksi korkean lämpötilan saavuttaessa akusta vapautuu palavaa elektrolyyttiä, joka tulee jäähdyttää ja sammuttaa käyttämällä vettä. Lisämainintana on, ettei akku sammu käyttämällä sammutusjauhetta. (General Motors 2017)

Täyssähköauton Hyundai IONIQ5 ohjeistuksessa suositellaan sammuttamaan pieni palo mihin ei liity korkeajänniteakku sammutusjauheella. Korkeajänniteakun palaessa tulee varautua vähintään 10 000 litraan vettä akun jäähdyttämiseen. Sammuttamiseen ei tulisi käyttää merivettä, koska se saattaa aiheuttaa myrkkyaasuja tai uudelleen syttymisen. Ajoneuvon upottaminen sammutuskonttiin on suositeltavaa. Sammutettu akku suositellaan säilytettäväksi avoimessa tilassa 15 metrin päästä palavasta materiaalista. (Hyundai 2021)

Suomen Palopäälystöliiton toimintaohjeissa autopalossa ensin tunnistetaan onko ajoneuvo sähkö- vai polttomoottorikäyttöinen. Jos ajoneuvo on sähköauto, arvioidaan palaako ajoneuvon akku vai ei. Akkupalon tyypillisiksi tunnusmerkeiksi on listattu: sarja poksahduksia, akkujen turpoaminen, valkoinen savu akustosta sekä akkujen lämpötilan nousu. Ohjeistuksessa huomautetaan sähköautopalon vaativan useita tuhansia litroja vettä, joten lisävedensaannista tulee varmistua säiliöautoilla, paloposteilla tai luonnonvedenottoaikalla ennen sammuttamisen aloittamista. Vesisuihku tulee kohdistaa akkuihin, mistä purkautuu savua tai liekkejä. Akkujen jäähdyttämistä tulisi jatkaa, kunnes lämpökameralla mitattu akuston lämpö on laskenut reilusti alle 80 asteen. Tämän jälkeen siirrytään jälkivartiointiin, jossa tarkkaillaan, ettei akun lämpötila kohoa uudelleen. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Erilaisia sammutusvälineitä sähköautopaloihin:

- sammutuskontti
- alustasprinkleri
- pistosuihkuputki
- sammutuspeite
- suodattava sammutuspeite.

Sammutuskontin tarkoituksena on saada auton akusto jäähtymään uudelleen syttymisen ehkäisemiseksi. Alkusammutuksen jälkeen ajoneuvo nostetaan vesitiiviiseen konttiin, joka täytetään vedellä niin, että auton akusto peittyy kokonaan. (Lähdetluoma 2020) Kontin käyttö ehkäisee palon leviämisen sekä sillä saadaan kerättyä sammutusvedet talteen jatko käsittelyä varten. Upottaminen aiheuttaa oikosulunvaaran ehjissä kennoissa ja näin ollen auto voi syttyä uudelleen vesien poistamisen jälkeen. Kontin käyttöä pidetään myös osittain epäkäytännöllisenä. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Alustasprinkleri asetetaan palavan ajoneuvon alle, jolloin kyetään jäähdyttämään sähköautonpohjassa sijaitsevia akkuja. Asettamisen jälkeen alustasprinkleri voidaan jättää itsenäisesti jäähdyttämään akkuja. (Palosuojelurahasto 2021a) Koska alustasprinkleri, jäähdyttää akkuja itsenäisesti ei sammuttajat altistu myrkyllisille palokaasuille. Erilaisista akustoratkaisuista johtuen, jäähdyttäminen saattaa olla jopa hidasta eikä sammutusvesiä saada kerättyä talteen. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Jännitesuojattu pistosuihkuputki lyödään suoraan akkukennoon. Putkea pitkin vettä saadaan syötettyä suoraan kennoon, jolloin sitä voidaan jäähdyttää tehokkaasti sisältäpäin. Pistosuihkuputki on kallis erikoistyökalu, jonka käyttöä autonvalmistajat eivät suosittele. Lisäksi vaarana on palon leviäminen ehjiin akkukennoihin, jos palavaa kennoa ei paikanneta oikein. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Sähköauton sammuttamiseen tarkoitetulla sammutuspeitteellä saadaan hidastettua palon leviämistä viereisiin ajoneuvoihin. Peite levitetään palavan ajoneuvon päälle, jolloin se tukahduttaa palon. Ongelmana on, ettei se estä akkupalossa muodostuvan hapen syntyä eikä näin ollen sammuta akkupaloa. Peite saattaa myös palaa puhki voimakkaassa palossa sekä sen alle muodostuu herkästi syttyvää kaasua. (Suomen Palopäälystöliitto 2022)

Suodattava sammutuspeite asetetaan palavan sähköauton päälle, jolloin saadaan rajattua paloa. Peite muodostaa kaasutiiviin hupun auton ympärille, jonka ansiosta palossa muodostuvat myrkylliset kaasut saadaan ohjattua suodattimelle. Hupussa olevasta liittimestä saadaan syötettyä sammutusvettä hupun suuttimille, jotka sammuttavat auton sekä jäähdyttävät akkua. (Palosuojelurahasto 2021b). Suodattava sammutuspeite on suunniteltu suljettuihin tiloihin sekä parkkihalleihin, joihin on hankala saada sammutuskalustoa (Puranen 2021).

Sähköauton ja sen akun palaessa vapautuu ilmaan myrkyllisiä kaasuja. Näistä haitallisimpia ihmiselle on vetyfluoridi, vetykloridi sekä hiilioksidi. Työterveyslaitoksen mukaan

vetyfluoridi reagoi veden kanssa muodostaen syövyttäviä ja myrkyllisiä höyryjä, jotka aiheuttavat ärsytystä hengitysteissä sekä silmissä yli 5 ppm pitoisuuksilla. Suuremmille pitoisuuksille altistuminen 50–250 ppm sietämätöntä kipua silmissä, iholla ja limakalvoilla sekä saattaa aiheuttaa hengitysteiden syöpymiä. (Työterveyslaitos 2022a) Myös vetykloridikaasut ovat syövyttäviä. Tunnin mittainen altistuminen 50–100 ppm pitoisuudelle vetykloridia aiheuttaa voimakasta ärsytystä nenässä, hengitysvaikeuksia ja yskää. Vetykloridi aiheuttaa hengenvaarallisen keuhkopöhön, kun pitoisuudet ovat 1 000–2 000 ppm. Viiden minuutin altistuminen 3 000 ppm pitoisuudelle aiheuttaa kuoleman. (Työterveyslaitos 2022b) Kaikessa palamisessa syntyy hajutonta hiilimonoksidia eli häkää. Kymmenen minuutin altistuminen 1 000–10 000 ppm hiilimonoksidille aiheuttaa päänsärkyä, huimausta sekä hengästymistä. Pidempi aikainen altistuminen aiheuttaa kuoleman pitoisuudesta riippuen. (Työterveyslaitos 2022c).

Akustopaloa sammuttaessa sammutusvesi on kosketuksissa hajonneen akkukennon kanssa ja näin ollen siihen siirtyy vesistöille ja maaperälle haitallisia kemikaaleja. Sveitsin liittovaltion tievirasto on tutkinut vuonna 2020 sähköautopaloja maanalaisessa infrastruktuurissa. Osana tutkimusta on tutkittu sammutusvesiä, jotka syntyvät 4kWh NMC-akkumoduulin sammuttamisesta. Testissä akku sammutettiin, jonka jälkeen se asetettiin jäähtymään 42 litraiseen säiliöön, joka oli täynnä vettä. Sammuttamiseen käytettyä sammutusvettä kerättiin talteen noin 200 litraa. (Mellert 2020)

| | Sulfaatti | Fluoridi | Nikkeli |
|---------------|-----------|----------|---------|
| Sammutusvesi | 34 mg/l | 8 mg/l | 36 mg/l |
| Jäähdytysvesi | 98 mg/l | 330 mg/l | 55 mg/l |

Taulukko 1. Sammutusvesistä mitattuja pitoisuuksia. (Mellert 2020)

Oulun Veden viemäriin johdettavien jätevesien raja-arvo sulfaateille on 400 mg/l, fluoridille 50 mg/l sekä nikkeliä 0,5 mg/l (Oulun Vesi 2020). Jäähdytysvesi ylittää raja-arvoiltaan niin fluoridi- kuin nikkeliä pitoisuuksiltaan. Sammutusvesi ylittää myös nikkelin raja-arvot moninkertaisesti. Näin ollen kumpikaan sammutusvesiä ei saisi johtaa viemäriin.

5.4 Sähköautopalot Suomessa

Suomessa pelastustoimen tehtävät kirjataan Pronto-rekisteriin. Rekisterin tarkoituksena on muodostaa resurssi ja -onnettomuustilastoja sekä kehittää pelastustoimen työtä onnettomuuksien selvittämisessä seurattavien tilastojen avulla. Netissä Pronto-rekisteristä on kaikille saatavilla online-tilastot sekä pelastustoimen taskutilasto. Tilastoissa on alueittain pelastustoimen saadut tehtävät hätäkeskukselta. Pelastustoimi kirjaa jokaisesta tehdystä tehtävästä mm. seuraavia tietoja: toimeksiannon tyyppi, onnettomuuden teknisiä yksityiskohtia, käytetyt pelastusmenetelmät, käytetty kalusto ja ajoneuvot, arvio onnettomuuden aiheuttavista vahingoista sekä arvio onnettomuuden syystä (Pelastuslaki 2003). Edellä mainitut yksityiskohdat ei käy ilmi online-tilastoista.

| Vuosi | Henkilöauto | Pakettiauto |
|-------|-------------|-------------|
| 2016 | 1369 | 157 |
| 2017 | 1285 | 150 |
| 2018 | 1354 | 151 |
| 2019 | 1322 | 164 |
| 2020 | 1290 | 156 |

Taulukko 2. Tieliikenneajoneuvojen tulipalot vuosina 2016–2020 (Loponen & Liukkonen 2022).

Pronto-rekisteriin kirjattuihin liikennevälinepalotilastoihin ei olla erikseen eritelty sähköajoneuvopaloja vaan ne löytyvät sieltä käyttämällä erilaisia hakusanoja. Tarmo Helander esittää opinnäytetyössään tehdystä Pronto-rekisteri tutkimuksessaan, että vuosina 2017–2022 sähkö- ja hybridi ajoneuvojen liikennevälinepaloja koskevia tehtäviä löytyy yhteensä 18 kappaletta. Näistä tehtävistä viidessä oli akustossa tapahtunut lämpörynnäys, joka oli johtanut akustonsyttymiseen. (Helander 2022) Vesa Linja-Aho on tehnyt Pronto-rekisteri tutkimuksen vuosilta 2015–2019. Tutkimuksessa selviää, että vuosina 2015 ja 2016 hybridi- ja sähköajoneuvopaloja on ollut yhteensä viisi kappaletta. (Linja-aho 2020)

Viime aikoina sähköautopalot ovat herättäneet paljon keskustelua mediassa. Näyttävät palotilanteet ja uudelleensyttymisriski herättävät ihmisissä mielenkiintoa ja näin ollen niistä uutisoidaan herkemmin kuin polttomoottoriajoneuvojen paloista. Alle poimittu tuoreimpia Suomessa tapahtuneita sähköautopaloja.

Täyssähköauto Kia EV6 paloi Lopella 31.3.2023. Kuljettaja oli huomannut auton savutaneen, jonka jälkeen hän oli pysäyttänyt auton ajoradan reunaan. Hetkeä myöhemmin se oli syttynyt palamaan. Pelastuslaitos sai sammutettua ajoneuvon ja todennut, ettei kyseessä ollut akkupalo. Ajoneuvo hinattiin tarkkailuun eikä se syttynyt uudelleen. (Järveläinen 2023)

Kuljettaja huomasi hybridi-autonsa alkaneen muodostamaan savua kesken ajon valtatie viidellä Mikkelissä 18.5.2023. Hän ajoi ajoneuvon rampille ja pysäytti ajoneuvon. Kuljettaja sekä matkustajat poistuivat autosta. Tässä vaiheessa savua oli päässyt jo auton sisäpuolelle. Pelastuslaitoksen tullessa paikalle ajoneuvo paloi jo rajusti. Auto sammutettiin ja asetettiin sammutuskonttiin. Palon seurauksena auto tuhoutui täysin. (STT 2023)

Volkswagen ID.Buzz oli latauksessa Lahden keskustassa sijaitsevassa pysäköintihallissa 3.6.2023. Latauksen aikana sähköautossa räjähti. Tilanteesta ei aiheuttanut liekki-paloa, mutta auto oli savunnut rajusti. Päijät-Hämeen pelastuslaitoksen päivystävän palomestarin mukaan ajoneuvon akku ei vaikuttanut vaurioituneelta. (Rautavuori 2023) Ajoneuvo hinattiin maahantuojaan pihaan, jossa se syttyi itsestään palamaan kolme päivää myöhemmin. Pelastuslaitos sammutti ajoneuvon, jonka jälkeen se nostettiin sammutuskonttiin. Ajoneuvo oli pamahdellut ennen sammutusta. (Yle 2023 b)

6 POHDINTA

On sanomattakin selvää, että autokanta tulee muuttumaan merkittävästi tulevaisuudessa. Euroopan komission uhatessa autonvalmistajia sakoilla, moni on siirtynyt käyttämään malleissaan sähköä käyttövoimana, ellei kokonaan niin osittain. Valmistajat ovat julkaisseet suunnitelmia sähköistymistä varten. Jotta päästöttömät uudet henkilöautot saavutettaisiin vuoteen 2035 mennessä. Ennen pitkään saattaa olla, ettei polttomoottorilla varustettua henkilöautoa saa ostettua enää uutena Suomesta. Tällä hetkellä näyttää siltä, että sähköauto on tulevaisuuden kulkupeli.

Nykyisiä akkutekniikoita tarkastellessa litiumioniakku on varsin toimiva ratkaisu, jotta saavutetaan suuremmat toimintamatkat ja pienemmät rakenteet. Uudenlaisia akkuja tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti, mutta litiumioniakkua korvaavaa akkutyyppeä ei olla vielä löydetty. Millaisia nämä tulee olemaan sen vain aika näyttää, löydetäänkö ongelmatonta vaihtoehtoa.

Euroopan markkinoille tuleville sähköautojen akuille on tietyt vaatimukset ja testit, jotka niiden tulee läpäistä. Tämä estää, ettei huono laatuista akkuja päädy markkinoille. Autonvalmistajat eivät myöskään tahdo, että heidän mallinsa on koko ajan uutisissa akuston itsestään syttymisen vuoksi. Tämä asettaisi valmistajan huonoon valoon ja imagon menetykseen. Auton valmistajat usein testaavat akkuja minimivaatimuksia enemmän, jotta he saavat mahdollisimman turvallisen ja luotettavan ajoneuvon markkinoille.

Jos sähkö- ja hybridiajoneuvojen palaminen ei ole edennyt akustoon, ei sen sammuttaminen eroa merkittävästi polttomoottoriajoneuvosta. Sähköauton sammuttaminen on hankalaa vain, jos palo on edennyt akustoon. Pelastushenkilöstöä koulutetaan jatkuvasti ja Suomen Palopäälystöliitto onkin luonut selkeän toimintamallin sähköautopaloja varten. Suurimman haasteen tuovat ahtaat monikerroksiset tai maanalaiset parkkihallit, joihin on hankala saada sammutuskalustoa paikalle. Tällaiset kiinteistöt olisi hyvä varustaa paloposteilla, jotta varmistetaan pelastustoimen vedensaanti akun jäähdyttämiseen tarvittavaa suurta vesimäärää katsoen. Maanalaisessa parkkihallissa ei ole välttämättä kaikkein viisainta asentaa sähköautojen latauspisteet alimpaan kerrokseen, vaan suotavampaa olisi asentaa ne uloskäyntien läheisyyteen. Palon nopea eristäminen osoittautuu tärkeäksi, jotta lisävahingoilta vältyttäisiin, varsinkin kun viereisen auton palaminen saattaa aiheuttaa lämpöryntäyksen ajoneuvon korkeajänniteakussa kuumuuden seurauksena.

Savunpoistoon olisi syytä myös kiinnittää huomiota. Ulkotiloissa savunpoisto ei tuota ongelmia, mutta suljetuissa tiloissa myrkylliset palokaasut eivät pääse poistumaan. Tämä hankaloittaa pelastustoimen työtä. Nykyajan trendinä on, että onnettomuuspaikalla kaiseen ensimmäisenä puhelin taskusta ja kuvataan tapahtuma. Varsinkin suljetuissa tiloissa kuvaaja altistuu hengelle vaarallisille palokaasuille. Pelastushenkilöstö on varustettu tarvittavalla paloasulla sekä paineilmahengityslaitteilla, jotka suojaavat pelastajaa myrkyllisiltä kaasuilta, lämmöltä sekä akkuista paukahtelevista irtokappaleilta.

Työssä läpikäytyt sähköautopaloihin tarkoitetut sammutusvälineet olivat enimmäkseen tarkoitettu henkilöautojen sammuttamiseen. Henkilöautolle tarkoitettu sammutuspeite ei mahdu kuorma-auton päälle eikä alustasprinkleri toimi sähköbussissa, koska niissä akut ovat usein sijoitettu ajoneuvonkatolle. Kirjoittajalle heräsi työtä tehdessä kiinnostus, että onko raskasliikenteelle kehitetty omia menetelmiä ja välineitä.

Sammutusvesitutkimuksessa selvisi, ettei sähköautopalon sammuttamiseen käytettyä vettä saisi johtaa viemäriin. Tutkimuksessa testiakkuna käytettiin yhtä 4 kWh akkumoduulia. Todellisuudessa sähköautojen akut ovat suurempia ja useamman kennon palaessa haitallisten aineiden pitoisuudet olisivat korkeampia. Toisaalta akkupalo alkaa usein yhdestä kennosta, eikä koko akusto leimahda tuleen samanaikaisesti. Nopealla sammutuksella ja jäähdytyksellä saadaan estettyä lämpöryntäyksen edistymisen muissa kennoissa ja näin minimoidaan myös haitalliset aineet vedessä. Pelastustoimen ohjeissa kerrotaan estämään akkukosketuksissa olleen sammutusveden pääsy viemäriin, mikäli mahdollista. Tämä saattaa kuitenkin olla hankalasti toteutettavissa. Veteen upotetun akun haitallisten aineiden pitoisuudet ovat moninkertaiset verrattuna sammuttamiseen käytetyn veden. Sammutuskontissa käytetyn veden saa helposti kerättyä kaasaan ja kuljetettua jatkokäsittelyä varten.

Vuosina 2015–2022 on kirjattu Pronto-rekisteriin 23 kappaletta sähkö- ja hybridiajoneuvo liikennevälinepaloa. Keskimääräisesti tämä on 2.9 paloa per vuosi. Tieliikennevälinepaloja on vuosittain noin 2 100 kappaletta. Sähköautopalo ei ole siis pelastustoimelle jokapäiväinen tehtävä vaan varsin harvinainen. Huomiona myös se, että suurimmassa osassa sähköliikennevälinepalotehtävistä ei ollut kyse akkupalosta. Arviolta sähköautopalon todennäköisyys on pienempi kuin polttomoottorillisessa ajoneuvossa. Täyssähköautoista ei löydy palavia nesteitä. Polttomoottoriajoneuvon moottoritilassa saattaa syntyä polttoainevuoto, joka lämmön seurauksena syttyy palamaan. Riski kasvaa mitä vanhempi polttomoottoriauto on ja Suomessa on tunnetusti vanha autokanta. Sähkö- ja

hybridiauto palot tulee todennäköisesti kuitenkin kasvamaan ajoneuvokannan muutoksen seurauksena.

Työn tietoperustan kokoaminen oli hankalaa. Suuri osa litiumioniakkujen teknisestä tiedosta löytyi englannin kielisistä lähteistä. Varsinkin termien oikeaoppinen suomentaminen hidasti työtä. Prosessin aikana litiumioniakuista ilmestyi suomenkielinen kirja sekä useita nettilähteitä. Se kuvastaa kuinka uuden, mutta silti ajankohtaista aihetta opinnäytetyössä käsitellään. Tietoperustan koonnin jälkeen, työn kirjoittaminen eteni luontevammin ja johdonmukaisemmin.

Monesti käsitys sähköautopaloista tulee vain mediasta, jossa sitä korostetaan. Polttomootorillisen henkilöauton palamisesta koskevaa uutisointia ei usein näy vaan otsikoihin nousevat nimenomaan sähköautojen palot. Aihetta ei tulisi kuitenkaan vähätellä, koska vahingoittuneet litiumioniakut ajoneuvoissa ovat luoneet uusia haasteita mm. pelastustoimelle ja kiinteistösuunnittelulle.

Opinnäytetyön tekeminen avasi tekijällekin uusia näkökulmia aiheeseen liittyen. Yllättävää oli miten tuoreesta asiasta on kyse, mutta silti erilaisia sammutusvälineitä on jo kehitetty. Työn rajoituessa pelkkiin henkilöautoihin, tulevaisuudessa voisi tutkia myös raskasliikenteessä käytettäviä litiumioniakkuja ja niiden paloturvallisuutta.

LÄHTEET

Aaltonen, J. 2023. Orpo: Ilmasto-tavoitteesta ei peruuteta, kehitys-avusta tullaan leikkaamaan. Helsingin Sanomat 15.5.2023. Viitattu 11.6.2023. <https://www.hs.fi/politiikka/art-2000009575375.html>

Andersson, N. Teknologiajohtaja. Jeti Industries Oy. Turku. Teams-kokous 18.5.2021. Haastattelijana Miko Riihimäki. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Andrea, D. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs. E-kirja Ebook Central -kirjapalvelussa. 1. painos. Boston: Artech House. Vaatii kirjautumisen palveluun. 16, 60, 63, 64. Viitattu 8.6.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=617500>

Battery University 2021. BU-205: Types of Lithium-ion. Viitattu 27.5.2023. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion

Battery University 2022. BU-204: How do Lithium Batteries Work? Viitattu 27.5.2023. https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

Bisschop, R.; Willstrand, O.; Amon, F. & Rosengren, M. 2019. Fire Safety of Lithium-Ion Batteries in Road Vehicles. E-kirja ResearchGate-kirjapalvelussa. Borås: Research Institutes of Sweden AB. Viitattu 19.5.2021. https://www.researchgate.net/publication/336640117_Fire_Safety_of_Lithium-Ion_Batteries_in_Road_Vehicles

Euroopan komissio 2023. CO2 emission performance standards for cars and vans. Viitattu 20.5.2023. https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en#tab-0-0

General Motors 2015. Chevrolet Volt Emergency Response Guide. Viitattu 8.6.2023. https://www.gmstc.com/wp-content/uploads/PDFs/Chevrolet/Volt/2011-15_Volt_EREV_FRG_v2.pdf

Helander, T. 2022. Sähköautojen akkupalojen sammutusmenetelmät. Opinnäytetyö (AMK). Pelastusalan päällystötutkinto. Poliisiammattikorkeakoulu. 23, 57–59 Viitattu 9.6.2023. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/780338/Sa%CC%88hko%CC%88autojen%20ak%20kupalojen%20sammutusmenetelma%CC%88t.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Hyundai 2021. IONIQ5 Electric Emergency Response Guide. Viitattu 8.6.2023. https://www.hyundai.com/content/dam/hyundai/au/en/documents/IONIQ_5_Emergency_Response_Guide_2021.pdf.pdf

Järveläinen, V. 2023. Uusi täyssähköauto paloi Lopella. MTV3 4.4.2023. Viitattu 9.6.2023. <https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/uusi-sahkoauto-paloi-lopella-palomestari-kertoo-miksi-paikalle-lahdettiin-perati-viiden-yksikon-voimin/8669230#gs.05tri3>

Kotimaisten kielten keskus 2023. Hitaus. Viitattu 20.5.2023. <https://www.kielitoimistonsanakirja.fi/#/hitaus>

Linja-aho, V. 2020. Hybrid and Electric Vehicle Fires in Finland 2015–2019. Viitattu 9.6.2023. <https://www.ri.se/sites/default/files/2020-12/linja-aho-paper-FIVE%20Hybrid%20and%20Electric%20Vehicle%20Fires%20in%20Finland%202015%E2%80%932019.pdf>

Loponen, T. & Liukkonen, H. 2022. Pelastustoimen taskutilasto 2016–2020. Pelastusopiston E-julkaisu. 23. Viitattu 9.6.2023. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2022.pdf

Lähdetluoma, M. 2020. Tuleen syttynyt sähköauto on vaikea sammuttaa: palokunta kehitti itse ongelmaan ratkaisun, jossa akku upotetaan veteen. Yle 12.5.2020. Viitattu 9.6.2023. <https://yle.fi/a/3-11341995>

Mellert, D. L. 2020. Risk minimisation of electric vehicle fires in underground traffic infrastructures. 30, 45–46, 78 Viitattu 10.6.2023. https://plus.empa.ch/images/2020-08-17_Brandversuch-Elektroauto/AGT_2018_006_EMob_RiskMin_Undergr_Infrastr_Final_Report_V1.0.pdf

Musk E. 2021 (@elonmusk). Twiitti 25.2.2021. Twitter-mikroblogipalvelu. (Vastaus käyttäjälle S. Korus.) Viitattu 5.3.2021. <https://twitter.com/elonmusk/status/1365055830085763081?s=20>

Ojanperä, S. 2023. Parkkihallissa lauantaina räjähtänyt sähköauto syttyi nyt liekkeihin autoliikkeen pihassa. Yle 6.6.2023. Viitattu 9.6.2023. <https://yle.fi/a/74-20035416>

Oulun Vesi 2020. Viemäriin johdettavien jätevesien laatu. Viitattu 10.6.2023. <https://www.ouluvesi.fi/documents/399509/17677332/Viem%C3%A4riin+johdettavien+j%C3%A4tevesien+rajarvot/a9cd306e-f126-4f42-b972-d4e27d1bb4da>

Palosuojelurahasto 2021a. Palosuojelurahaston Innovaatiopalkinnon 2021 jaettu toinen sija myönnettiin alustasprinklerin kehittämisestä. Viitattu 9.6.2023. <https://www.palosuojelurahasto.fi/ajankohtaista/palosuojelurahaston-innovaatiopalkinnon-2021-jaettu-toinen-sija-myonnettiin-alustasprinklerin-kehittamisesta>

Palosuojelurahasto 2021b. Palosuojelurahaston 14. Innovaatiopalkinto Marko Hassiselle, Juha Laitiselle ja Jari Mikkoselle. Viitattu 9.6.2023. <https://www.palosuojelurahasto.fi/ajankohtaista/palosuojelurahaston-14-innovaatiopalkinto-marko-hassiselle-juha-laitiselle-ja-jari-mikkoselle>

Pelastuslaki 13.6.2003/468.

Pistoia, G. 2014: Lithium-ion batteries: Advances and applications. E-kirja Ebook Central -kirjapalvelussa. 1. painos. Elsevier. Vaatii kirjautumisen palveluun. 462. Viitattu 27.5.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/reader.action?docID=1583621>

Puranen, K. 2021. Sähköautopalon myrkyt jäävät nyt sammutuspeitteeseen. Pelastustieto 30.12.2021. Viitattu 9.6.2023. <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/kalusto/sahkoautopalon-myrkyt-jaavat-nyt-sammutuspeitteeseen/#c305f8aa>

Rautavuori, L. 2023. Latauksessa ollut sähköauto räjähti Lahden toriparkissa. Yle 3.6.2023. Viitattu 9.6.2023. <https://yle.fi/a/74-20035023>

STT 2023. Hybridiauto syttyi palamaan ajon aikana 5-tiellä. Ilta-Sanomat 18.5.2023. Viitattu 9.6.2023. <https://www.is.fi/kotimaa/art-2000009595204.html>

Suomen Palopäälystöliitto 2022. Toimintaohje 12/2022, Sähköautopalo pysäköintilaitoksessa. Viitattu 8.6.2023. https://sppl.fi/content/uploads/2023/01/OHJE_Sahkoautopalo-pysakointilaitoksessa_SPPL.pdf

Teknologian tutkimuskeskus VTT 2020. Riskit sähköajoneuvojen latauksessa. Viitattu 15.5.2021. https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/44530002/Riskit_s_hk_ajoneuvojen_latauksessa_200414.pdf

Tesla 2023. Emergency Response Guide Tesla Model 3. Viitattu 8.6.2023. https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Guide_en.pdf

Traficom 2023. Tilastotietokanta. Ajoneuvojen ensirekisteröinnit maakunnittain 2001–2023. Viitattu 19.5.2023. https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Ensirekisteroinnit/030_ensirek_tau_103.px/

Työterveyslaitos 2022a. Fluorivety ja fluorivetyhappo. Viitattu 9.6.2023. <https://ova.ttl.fi/fluorivety-ja-fluorivetyhappo>

Työterveyslaitos 2022b. Kloorivety ja suolahappo. Viitattu 9.6.2023. <https://ova.ttl.fi/kloorivety-ja-suolahappo>

Työterveyslaitos 2022c. Hiilimonoksidi. Viitattu 9.6.2023. <https://ova.ttl.fi/hiilimonoksidi>

UNECE 2022. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. Viitattu 25.5.2023. <https://unece.org/transport/documents/2022/03/standards/regulation-no-100-rev3>

Verohallinto 2023. Sähköautoja oli viime vuonna liki viidennes uusista autoista, jotka rekisteröitiin tai otettiin käyttöön Suomessa – korkeinta autoveroa maksettiin uusista dieselautoista. Viitattu 11.6.2023. <https://www.vero.fi/tietoa-verohallinnosta/uutishuone/lehdist%C3%B6tiedotteet/2023/sahkoautoja-oli-viime-vuonna-likiviidennes-uusista-autoista-jotka-rekisteroitin-tai-otettiin-kayttoon-suomessa--korkeinta-autoveroa-maksettiin-uusista-dieselautoista/>

Xiong, R. & Shen, W. 2019. Advanced battery management technologies for electric vehicles. E-kirja Ebook Central -kirjapalvelussa. 1. painos. Wiley. Vaatii kirjautumisen palveluun. Viitattu 27.5.2023. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/turkuamk-ebooks/detail.action?docID=5630273>

Ympäristöministeriö 2022. Keskipitkän aikavälin ilmastopolitiikan suunnitelma. Viitattu 11.6.2023. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/164186>