



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖ- JA HYBRIDIAUTOJEN PALOTURVALLISUUS

Hiltunen Teemu

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2022



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖ- JA HYBRIDIAUTOJEN PALOTURVALLISUUS

Hiltunen Teemu

Työn ohjaaja: Niskanen Perttu

KONETEKNIikka

Kandidaatintyö

Kesäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma (kandidaatintyö, diplomityö) Konetekniikan koulutusohjelma		Pääaineopinnojen ala (lisensiaatintyö) Konetekniikka	
Tekijä Hiltunen, Teemu		Työn ohjaaja yliopistolla Niskanen P	
Työn nimi Sähkö- ja hybridautojen paloturvallisuus			
Opintosuunta Auto- ja työkonetekniikka	Työn laji Kandidaatintyö	Aika Kesäkuu 2022	Sivumäärä 37
<p>Tiivistelmä</p> <p>Sähkö- ja hybridautojen määrä kasvaa tällä hetkellä voimakkaasti myös Suomessa. Sähköautoissa käytetyt litiumioniakut ovat termisesti ja sähköisesti melko epästabiileja. Kun niitä kootaan sähköautojen suuriksi akkupaketeiksi, vaativat ne tarkasti suunnitellun ohjausjärjestelmän, joka vastaa akuston turvallisesta toiminnasta. Väärinkäytön tai valmistusvian seurauksena akusto voi kuitenkin syttyä tuleen vakavin seurauksin. Siksi sähköautojen paloturvallisuus on alkanut herättää huolta ihmisten keskuudessa.</p> <p>Myös pelastusalan näkökulmasta sähköautopalot ovat varsin uutena ilmiönä haasteellinen. Jos akusto on osallisena autopalossa sen lähellä työskentely voi olla riskialtista suihkuliikkien tai heitteiden takia. Palavaa akustoa voi olla haasteellista sammuttaa, koska se on usein sijoitettu auton pohjaan ja suojattu vahvasti, miksi veden saaminen akustolle on vaikeaa. Lisäksi litiumioniakuston palo tuottaa runsaasti hengenvaarallisia kaasuja ympäröivään ilmaan.</p> <p>Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää sähkö- ja hybridautojen paloturvallisuuden nykytilaa Suomessa. Työssä perehdyttiin sähkö- ja hybridautojen tekniikkaan yleisesti, sähköautojen syttymismekanismeihin ja palavan sähköauton sammutukseen. Lisäksi tarkasteltiin Suomen autopalotilastoja ja arvioitiin sähkö- ja hybridautojen paloturvallisuuden kehitystä tulevaisuudessa. Tietoa aiheesta etsittiin kirjallisista lähteistä.</p> <p>Tarkoituksenmukaisessa käytössä sähkö- ja hybridautot ovat turvallisia ja paloriski on hyvin pieni. Sähköautojen tekniikka myös kehittyy jatkuvasti paloturvallisempaan suuntaan. Sähkö- ja hybridautojen määrän kasvaessa Suomessa jatkuvasti on todennäköistä, että myös sähköautojen paloja tulee olemaan enemmän tulevaisuudessa. Akuston aggressiivinen ja pitkäkestoinen palo voi aiheuttaa vaaran ihmisille ja lähetyvillä olevalle omaisuudelle. Pelastustoimi on jatkuvasti varautuneempi sähköautojen paloihin, mutta parempia tekniikoita ja sammutusvälineitä tarvitaan edelleen.</p>			

ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme (Bachelor's Thesis, Master's Thesis) Mechanical engineering (BSc. Tech.)		Major Subject (Licentiate Thesis) Mechanical engineering	
Author Hiltunen, Teemu		Thesis Supervisor Niskanen P	
Title of Thesis Fire safety of electric and hybrid vehicles			
Major Subject Automotive engineering	Type of Thesis Bachelor thesis	Submission Date June 2022	Number of Pages 37
Abstract <p>The number of electric and hybrid cars is currently growing strongly in Finland as well. Lithium-ion batteries used in electric cars are thermally and electrically quite unstable. When battery cells are assembled as large battery packages for electric cars, they require a precisely designed control system. However, as a result of misuse or manufacturing failure, the battery can catch fire with grave consequences. Therefore, the fire safety of electric cars has raised concerns among people.</p> <p>From the point of view of the rescue industry, electric car fires are also a challenge as a new phenomenon. If the battery participates in a car fire, working close to it can be risky because of shower flames or throws. It can be challenging to extinguish a combustible battery because it is often located in the bottom of the car and it is strongly protected, which is why it is difficult to get water to the battery. In addition, lithium-ion battery fire produces high levels of life-threatening gases into the surrounding air.</p> <p>The aim of this bachelor's thesis was to study the current state of fire safety for electric and hybrid cars in Finland. The work involved familiarization with the technology of electric and hybrid cars, the ignition mechanisms of electric cars and the extinguishing of burning electric cars. In addition, Finnish automobile fire statistics were examined and future fire safety developments for electric and hybrid cars were assessed. Information on the subject was searched from written sources.</p> <p>In appropriate use, electric and hybrid cars are safe, and the risk of fire is very low. The technology of electric cars is also constantly evolving in a more fire-safe direction. As the number of electric and hybrid cars continues to grow in Finland, it is likely that there will also be more electric cars fires in the future. Aggressive and long-lasting fire of the battery pack can pose a danger to people and nearby property. The rescue effort is even more prepared for electric car fires, but better technologies and extinguishing equipment are still needed.</p>			

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

LYHENTEET

1 JOHDANTO	6
2 SÄHKÖ- JA HYBRIDIAUTOT	7
2.1 Sähköautojen historiaa	7
2.2 Täyssähköautojen tekniikka	8
2.3 Hybridiautojen tekniikka.....	9
2.3.1 Ei-ladattavat hybridit	9
2.3.2 Ladattavat hybridit.....	10
2.4 Sähköautojen akustot	10
2.5 Sähköautojen lataus.....	11
3 SÄHKÖAUTON SYTTYMINEN JA PALAMINEN	15
3.1 Litiumioniakun palo ja lämpöryntäys	15
3.2 Akuston syttymissyyt	17
3.2.1 Sisäinen ja ulkoinen oikosulku	18
3.2.2 Mekaaninen vaurio	19
3.2.3 Ylilatautuminen ja -purkautuminen	20
3.2.4 Liian matala ja korkea lämpötila	21
3.3 Latauksen aiheuttama paloriski.....	22
4 SÄHKÖAUTOJEN PALOT SUOMESSA.....	24
4.1 Tilastot.....	24
4.2 Sähköautojen paloriskit tulevaisuudessa.....	25
5 SAMMUTUS- JA PELASTUSTYÖ	27
5.1 Sammutusmenetelmät	27
5.2 Ongelmat akkupalojen sammutuksessa.....	29
6 YHTEENVETO	32
LÄHTEET.....	34

LYHENTEET

BEV	Täyssähköauto (battery electric vehicle)
BMS	Akustonhallintajärjestelmä (battery management system)
EV	Sähköauto (electric vehicle)
HEV	Hybridiauto (hybrid electric vehicle)
LIB	Litiumioniakku (lithium-ion battery)
NiMH	Nikkelimetallihybridi
PHEV	Ladattava hybridiauto (plug-in hybrid electric vehicle)
SEI	Kiinteä elektrolyyttikerros (Solid Electrolyte Interface)
SOC	Lataustaso (state of charge)

1 JOHDANTO

Sähkökäyttöisten henkilöautojen suosio on Suomessa voimakkaassa kasvussa, ja tällä hetkellä sähköautojen määrä kaksinkertaistuu vuosittain. Sähkö- ja hybridautojen kehitys etenee nopeaa tahtia ja niiden suorituskykyä pyritään kasvattamaan jatkuvasti. Paloturvallisuuteen liittyvät seikat ovat alkaneet kuitenkin herättää yleisesti huolta. Sen lisäksi, että akustojen kapasiteettia ja energiatiheyttä kasvatetaan jatkuvasti, on akustoja mahdollista ladata aina vain nopeammin. Huolimatta lukuisista tekniikoista ja ohjausjärjestelmistä, jotka pyrkivät takaamaan sähköauton turvallisen toiminnan, on ennakkotapauksia akuston itsesyttymisistä jopa Suomessa. Jos sähköauton litiumioniakusto syttyy palamaan, aiheuttaa se haasteita pelastustoimelle. Paitsi, että akustopalo on yleensä vaikea sammuttaa, se syttyy myös herkästi uudelleen.

Ajatus kandidaatintyöhön heräsi halusta yhdistää sopimuspalokunta- eli VPK-taustaa ja pelastusalan tuntemusta jollain tavalla opintojen aihepiiriin. Sähköautojen kehitys ja paloturvallisuuteen liittyvät kysymykset ovat hyvin ajankohtaisia ja mielenkiintoisia, joten aiheeksi valikoitui lopulta sähkö- ja hybridautojen paloturvallisuus.

Työn tavoitteena on selvittää sähköautojen kehityksen nykytilaa etenkin paloturvallisuuden kannalta. Työssä sivutaan myös aihetta pelastustoimen näkökulmasta. Aihe on rajattu nimenomaan sähköä käyttövoimana hyödyntäviin henkilöautoihin, jolloin työn ulkopuolelle jäävät raskaan liikenteen kalusto ja keveämmät kulkuvälineet. Työ keskittyy pääosin sähkö- ja hybridautojen paloturvallisuuteen Suomessa etenkin tilastojen osalta.

2 SÄHKÖ- JA HYBRIDIAUTOT

Sähköautojen historia ulottuu 1800-luvun lopulle, jolloin polttomoottoritkin etsivät vielä paikkaansa ajoneuvoteollisuudessa. Sähkökäyttöiset autot jäivät kuitenkin pian voimakkaasti yleistyvien polttomoottorikäyttöisten autojen varjoon. 1900-luvulla tehdyn vaihtelevan ja hiljaisen kehitystyön tuloksena sähkökäyttöisyyttä on alettu jälleen 2000-luvun vaihteessa tuoda ajoneuvoihin, ja sähköautojen määrä on parin kymmenen vuoden aikana yltynyt räjähdysmäiseen kasvuun toinen toistaan parempien tekniikoiden kilpaillessa markkinoilla. Sähköautoille tavoitellaan jatkuvasti pidempää toimintamatkaa ja akustojen parempaa energiatiheyttä. (Ehsani et al. 2018)

2.1 Sähköautojen historiaa

Sähköauto on keksintönä polttomoottoriautoa vanhempi. Niiden historia ulottuu aina vuoteen 1881, jolloin ranskalainen Gustave Trouvé rakensi sähkökäyttöisen kolmipyörän 0,1 hevosvoiman tasavirtamoottorilla ja lyijyakulla. Laite ei kuitenkaan ollut kykenevä kilpailemaan edes hevoskärryjen kanssa 15 km/h nopeudella ja 16 km toimintasäteellä. Ensimmäinen kaupallinen sähköauto oli yhdysvaltalaisen Morrisin ja Salomin Electrobat, joka kahdella 1,5 hevosvoiman moottorilla kykeni 32 km/h nopeuteen ja 40 km toimintasäteeseen. Kalliista ostohinnasta huolimatta auto osoittautui hevoskärryjä kannattavammaksi taksikäytössä New Yorkissa. (Ehsani et al. 2018)

Aikakauden merkittävimpiä keksintöjä oli M. A. Darracqin keksimä jarrutusenergiaa talteen ottava järjestelmä, jonka tarkoituksena on palauttaa jarrutettaessa auton liike-energiaa akuille. Vielä nykyäänkin keksintö edistää sähkö- ja hybridautojen energiatehokkuutta etenkin kaupunkiajossa enemmän kuin mikään muu yksittäinen keksintö. (Ehsani et al. 2018)

Polttomoottoriautot yleistyivät 1900-luvun alussa muun muassa sähköstartin, automaattisen sytytysennakon ja paremman käytettävyyden myötä. Ne olivat myös huomattavasti edullisempia, minkä myötä sähköautojen käyttö tieliikenteessä loppui 1930-luvulla. Seuraavat 60 vuotta olivat sähköautojen hiljaiseloa. Vaikka 1970–1990 tehtiin sähköautoihin liittyen paljon kehitystyötä, eivät ne saavuttaneet suosiota polttoaineiden edullisuuden vuoksi. (Matulka 2014; Korhonen et al. 2019)

Vasta vuonna 1997 esiteltiin Japanissa Toyota Prius, joka oli ensimmäinen massatuotantona valmistettu hybridauto. Tätä on pidetty käännekohtana, jolloin useat automerkit kehittivät ja julkaisivat hybridautoja ja niiden suosio alkoi kasvaa polttoaineiden hinnannousun ja ilmastohuolien myötä. Puolestaan täyssähköautojen kehitystä vauhdittanut tapahtuma oli vuonna 2006 perustetun Tesla Motorsin valmistamien täyssähköautojen laaja suosio. Samalla sähköautojen akkuteknologia kehittyi, mikä alkoi hälventää sähköautojen ainaista ongelmaa, lyhyttä toimintasädettä. Myös muut autonvalmistajat toivat täyssähköisiä mallejaan markkinoille 2010 vuoden lopulla. (Matulka 2014; Ehsani et al. 2018)

2.2 Täyssähköautojen tekniikka

Täyssähköauto (BEV tai EV) hyödyntää nimensä mukaisesti käyttövoimanaan ainoastaan sähköä, jota varastoidaan akustoon sähköverkosta. Ajettaessa sähköä syötetään invertterin läpi sähkömoottorille, joka voimansiirron välityksellä saa auton liikkumaan. Sähkömoottori omaa tasaisen vääntökäyrän laajalla kierroslukualueella, minkä ansiosta monivaihteista vaihteistoa ei välttämättä tarvita. Alennusvaihte ja tasauspyörästö ovat kuitenkin usein tyypillisiä sähköautoissa. Myöskään polttomoottoreille ominaista mekaanista kytkintä tai tyhjäkäyntiä ei täyssähköautoissa käytetä, mikä tekee niiden perusrakenteesta varsin yksinkertaisen polttomoottorikäyttöisiin verrattuna. (Korhonen et al. 2019)

Täyssähköautossa on usein vain yksi sähkömoottori, mutta sen sijasta voidaan käyttää myös useampaa. Esimerkiksi nelivetomalleissa, joissa on usein molemmilla akseleilla oma moottorinsa. Joissain malleissa moottorit on puolestaan sijoitettu suoraan pyörän napoihin, mikä antaa uusia mahdollisuuksia alustarakenteiden ja vetotapojen suunnitteluun, mutta lisää kuitenkin jousittamatonta massaa. Jarrutettaessa sähkömoottori toimii tavallisten kitkajarrujen rinnalla generaattorina, jolloin se hidastaa auton liikettä palauttaen samalla kiihdytykseen käytettyä energiaa takaisin energiavarastoihin. Tätä kutsutaan myös regeneratiiviseksi jarrutukseksi. (Korhonen et al. 2019, Motiva Anon. 2021a)

Täyssähköauton akustojen koot ovat nykyään pääsääntöisesti välillä 20–100 kWh, joilla matkataan yhdellä latauksella noin 50–500 kilometriä olosuhteista ja autosta riippuen. Kova pakkanen ja suurten nopeuksien aiheuttama ilmanvastus alentavat toimintamatkaa

merkittävästi. Koska sähköinen voimalinja ei tuota niin paljon lämpöä, kuin polttomoottori, ei se riitä lämmittämään ohjaamoja, vaan se on lämmitettävä sähköllä. Lämmityslaite ja muut matalajännitteiset tasavirtalaitteet toimivat tyypillisesti erillisellä 12 V järjestelmällä, jossa olevaa akkua ladataan DC/DC-muuntimella auton korkeajännitejärjestelmästä. (Korhonen et al. 2019)

2.3 Hybridautojen tekniikka

Hybridautolla tarkoitetaan kahta eri voimanlähdettä käyttävää autoa, missä on käytännössä aina polttomoottori ja sen rinnalla yleensä sähkömoottori. Jo sähköautojen historian alkuaikoina sähkömoottoria on käytetty yhdessä polttomoottorin kanssa. Alkuun polttomoottorit olivat pienitehoisia ja niitä hyödynnettiin usein akkujen latauksessa toimintamatkan kasvattamiseksi, mutta 1900-luvun lopulla kehittyneiden polttomoottorien ollessa autojen pääasiallinen voimanlähde, sähkömoottoria alettiin hyödyntämään polttomoottorin apuna polttoaineen kulutuksen vähentämiseksi. Energiatiheämpien akkukennojen myötä akustojen kapasiteettia on kasvatettu, mikä on mahdollistanut hybridauton ajamisen myös pelkällä sähköllä. (Ehsani et al. 2018)

Hybriditekniikoista yleisimmät ovat sarja- ja rinnakkaishybridi. Sarjahybridissä polttomoottori tuottaa energiaa generaattorin avulla sähkömoottorille, joka tuottaa auton liike-energian. Sarjahybridin etuna on se, että polttomoottori voi toimia jatkuvasti optimaalisella kierrosalueellaan, ja sähkömoottorilta yli jäävä energia voidaan varastoida akustoon. Akun ollessa riittävän täysi, voidaan polttomoottori sammuttaa hetkeksi. Rinnakkaishybridissä puolestaan poltto- ja sähkömoottori tuottavat molemmat liike-energiaa itsenäisesti ja ne on yhdistetty voimalinjaan rinnakkain. Sähkömoottorin tehtävänä on avustaa polttomoottoria kuormittavimmissa tilanteissa kuten kiihdytyksissä. Lisäksi on olemassa erilaisia edellä mainittujen hybriditekniikoiden yhdistelmiä. (Ehsani et al. 2018)

2.3.1 Ei-ladattavat hybridit

Nykyaikaisessa ei-ladattavassa hybridautossa (HEV) on polttomoottorin lisäksi pieni akusto ja sähkömoottori, joiden tarkoitus on alentaa polttoaineenkulutusta merkittävästi etenkin kaupunkiajossa, mikä puolestaan vähentää päästöjä. Voimakasväentöistä sähkömoottoria käytetään kiihdytettäessä polttomoottorin tukena ja jarrutettaessa se

toimii generaattorina alentaen nopeutta ja palauttaen energiaa takaisin akustoon tai vaihtoehtoisesti kondensaattoriin, joka on akkua nopeampi ottamaan vastaan ja purkamaan energiaa. Koska pienellä kuormituksella polttomoottorin hyötysuhde on heikompi kuin täydellä kuormalla, voidaan sitä hyödyntää ajon aikana myös akun lataamiseen ja välillä sammuttaa kokonaan, mikä nostaa auton kokonaishyötysuhdetta. Tyypillisesti hybridautoa ei ole tarkoitettu ajettavaksi pelkällä sähköllä, joten akuston kapasiteetiksi riittää noin 1 kilowattitunti. (Ehsani et al. 2018; Korhonen et al. 2019)

2.3.2 Ladattavat hybridit

Ladattaviksi hybrideiksi (PHEV) kutsutaan hybridautoja, joiden akkuja voidaan ladata kiinteästä sähköverkosta. Niiden akuston kapasiteetti on ei-ladattavaa hybridiä paljon suurempi, noin 10 kilowattitunnin suuruusluokkaa, mikä mahdollistaa ajamisen polttoaineen lisäksi myös pelkällä sähköllä. Akustoja voidaan ladata myös polttomoottorin avulla ja jarrutusenergian talteenotolla. Yleensä ladattavan hybridin toimintamatka sähköllä on noin 20–50 km, mikä on usein riittävä päivittäisajoihin. Ladattavien hybridien toimintamatka on kokonaisuudessaan vielä täyssähköautoja huomattavasti pidempi polttoaineen suuren energiatiheyden vuoksi, mutta ne tuottavat enemmän päästöjä liikenteessä. Se on kuitenkin yleensä perus polttomoottoriautoa vähäpäästöisempi vaihtoehto. (Korhonen et al. 2019; Sharma et al. 2020)

2.4 Sähköautojen akustot

Sähköautojen tekniikassa merkittävä kehityksen ja tutkimustyön kohde ovat aina olleet sähköenergian varastointijärjestelmät. Pääpaino on etenkin niiden energiatiheyden parantamisessa, koska akuston kapasiteetin kasvattaminen toimintamatkan lisäämiseksi, lisää myös auton kokonaismassaa. Sähköautoissa energia varastoidaan akkupakettiin, joka koostuu tyypillisesti sarjaan ja rinnan kytketyistä kennoista niin, että saadaan aikaan haluttu jännite ja kapasiteetti. Usein kennot on ryhmitelty erillisiin moduuleihin, jotka on kytketty toisiinsa. Akustot sisältävät lisäksi rakenteita ja järjestelmiä latauksen, purkamisen ja lämmönhallinnan mahdollistamiseksi. Tärkein akuston toimintaa ohjaava laite on akustonhallintajärjestelmä (BMS), joka on suunniteltu varmistamaan, että akusto toimii aina turvallisesti. (Sharma et al. 2020)

Toistaiseksi markkinoilla olevista akkutekniikoista suurimman energiatheyden myötä käytetyimmäksi ovat nousseet litiumionikennot. Kun perinteisten polttomoottoriautojen lisälaitteakuissa käytetyn lyijy-happokennon energiatheys on 30–50 Wh/kg ja ei-ladattavissa hybrideissä yleisesti käytetyn nikkeli-metalli-hybridiakun energiatheys on korkeintaan 100 Wh/kg, on litiumioniakun energiatheys 150–200 Wh/kg. (Sharma et al. 2020)

Seuraava askel sähköautojen akkutekniikassa ovat todennäköisesti kiinteäelektrolyyttiset akut, jotka ovat tällä hetkellä kiinnostava tutkimuksen kohde akkuteollisuudessa. Kiinteän elektrolyytin etuina nestemäisiin verrattuna ovat sähköinen ja kemiallinen stabiilisuus sekä erityisesti alhainen syttymisherkkyys. Myöskään elektrolyytin vuotoriskiä ei ole. Eräs kiinteää elektrolyyttiä käyttävä akkutyyppe on litiumpolymeeriakku, jossa nestemäisen elektrolyytin tilalla käytetään polymeeripohjaista elektrolyyttiä. Yksi mielenkiintoisimmista ratkaisuista ovat litium-ilmakut, joiden energiatheys voi olla jopa 3620–5200 Wh/kg, mikä on varsin vakuuttavaa jo polttoaineiden energiatheyden rinnalla. Litium-ilmakujen tehokkaassa käytössä on kuitenkin vielä useita ongelmia, mikä hankaloittaa käyttöönottoa sähkö- ja hybridi-autoissa. (Manuel Stephan and Nahm 2006; Yoo et al. 2017; Wang et al. 2019)

Litiumioniakkukkenno koostuu kahdesta anodi- ja katodimateriaaleilla pinnoitetusta virrankerääjäfoliosta, niiden välin täyttävästä litiumsuolaa sisältävästä elektrolyytistä sekä anodin ja katodin erillään pitävästä erotinkalvosta. Anodin virrankerääjä on yleensä kuparia ja katodin alumiinia. Anodimateriaalina käytetään tyypillisesti hiiltä ja katodimateriaalina litiumin-metalli-oksideja kuten LiCoO_2 (LCO), LiMnO_4 (LMO) tai $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$ (NCA). Kerrokset on rullattu tiiviiksi pakatiksi sylinterimäiseen tai prismaattiseen koteloon. (Wang et al. 2019)

2.5 Sähköautojen lataus

Ladattaville autoille on laaja kirjo erityyppisiä ja eritehoisia lataustapoja, mutta lataustavan valinta riippuu pitkälti ladattavasta autosta. Yleisimmin virtaa syötetään latauksessa vaihtosähköllä (AC), jolloin auton oma latauslaite muuttaa virran tasavirraksi ja syöttää akustolle. Monia etenkin täyssähköautoja on mahdollista ladata tasasähköllä (DC), koska se mahdollistaa suuremman lataustehon käytön. Tällöin auton ulkopuolinen latauslaite syöttää suoraan auton akustolle tasavirtaa. Tällöin laturi kommunikoi auton

BMS:n kanssa, jotta akustoa ladataan oikealla virralla vaurioiden välttämiseksi. Sähköautoa voi ladata kotona pistorasiasta siihen tarkoitettulla latauslaitteella tai vaihtosähköverkkoon kiinteästi sijoitetulla latauslaitteella. Yksityisten kiinteistöjen lisäksi monissa julkisissa paikoissa, kuten kauppojen pihalla on sähköautojen latausta varten latausasemia ja ne yleistyvät jatkuvasti. Ladattavien autojen latausajat ovat jopa 15 minuutista aina 12 tuntiin. Siihen vaikuttavat käytettävä latausteho, akuston kapasiteetti, varaustaso ja lämpötila. (Korhonen et al. 2019)

Ladattavilla hybrideillä latausteho on yleensä yksivaiheisella vaihtosähköllä enimmillään 3,7 A (1 x 16 A), mutta jotkin mallit kykenevät jopa 10 kW (3 x 16 A) tehoon ja tasasähköllä jopa vielä suurempiin lataustehoihin. Täyssähköautoja on yleensä mahdollista ladata enimmillään 7,4 kW (1 x 32 A) vaihtosähkön teholla, mutta on myös malleja, joita voidaan ladata vaihtosähköllä jopa 43 kW (3 x 63 A) teholla. Tasasähkönlatauksessa tehot ovat tyypillisesti 50–100 kW, mutta yleistyvässä suurteholatauksessa on mahdollista ladata hetkellisesti jopa yli 500 kWh teholla. Suurten virtojen vuoksi suurteholatauksessa latauskaapelit ja pistokkeet ovat nestejäähdytettyjä. (Korhonen et al. 2019)

Latauksen aloittaminen vaatii aina jonkin vähimmäislatausvirran. Latausasemien standardeissa pienimmäksi mahdolliseksi AC-latausvirraksi ilmoitetaan 6 A, joka on yleinen vähimmäislatausvirta ladattavilla hybrideillä, mutta etenkin täyssähköautojen latausta se ei yleensä riitä käynnistämään, koska niiden vähimmäislatausvirta voi olla 13 A. (Korhonen et al. 2019)

Lämpötilalla on suuri vaikutus latauksen vastaanottoon etenkin litiumakkuja ladattaessa. Vaikka litiumakut kestävät purkamista kylmänä melko hyvin, lataaminen kovassa pakkasessa voi aiheuttaa niille vaurioita. Litiumakuille onkin lähes aina lämmitysjärjestelmä, joka käyttää osan lataamiseen syötetystä virrasta akun lämmittämiseen pakkasella. Akun lämmitys lisää latauksen tehontarvetta, jolloin etenkin kovilla pakkasilla (alle -20°C) 8 A virta ei välttämättä riitä käynnistämään latausta. Myös kuumaa akkuja ladattaessa voi tulla tarve rajoittaa lataustehoa ja mahdollisesti jäähdyttää akustoa. Tyypillisimmät jäähdytysmenetelmät ovat ilma ja nestejäähdytys. (Korhonen et al. 2019; Wang et al. 2019)

Sähköajoneuvojen lataustapoja on neljä, joista Suomessa suositellaan käyttämään ensisijaisesti lataustapoja 3 ja 4. Lataustavoissa 1–3 syötetään akustolle vaihtosähköä ja lataustavassa 4 tasasähköä. (Korhonen et al. 2019)

Lataustapa 1, Mode 1

Pääasiassa kevyiden sähköajoneuvojen kuten sähkömopojen, keveiden nelipyörien tai sähköisten liikkumisvälineiden lataukseen korkeintaan 16 A ja 250 V yksivaiheisella tai 480 V kolmivaiheisella vaihtovirralla. (Korhonen et al. 2019)

Lataustapa 2, Mode 2

Niin kutsuttu hidas lataus on tarkoitettu tilapäiseen lataukseen, jos lataustapaa 3 ei ole käytettävissä. Akustoa ladataan kotitalous- tai teollisuuspistorasiasta vaihtosähköllä. Kotitalouspistorasiasta ladattaessa edellytetään rajoittamaan pitkäaikainen latausvirta 8 ampeeriin, mutta on saatavilla myös kotitalouspistorasioita, jotka on suunniteltu kestämään jatkuvaa 16 A virtaa edellyttäen, että syöttävä verkko on riittävä sille. Kolmivaiheisesta teollisuuspistorasiasta voidaan ladata sen mitoitusvirralla, jopa 32 ampeerilla, pitkiäkin aikoja. (SESKO 2021)



Kuva 1. Tyypin 2 latauspistoke. (Hiltunen 2022)

Lataustapa 3, Mode 3

Peruslataukseksi kutsuttu lataustapa 3 on suositeltavin lataustapa sähköautoille. Latauslaite voi olla kotitalouden kolmivaiheiseen sähköverkkoon kytketty erityinen latauslaite tai julkinen sähköauton latauspiste. Suomessa julkisella latauspisteellä on oltava SFS-EN 62196-2 tyyppin 2 mukainen pistorasia tai ajoneuvopistoke (kuva 1), joka on Suomessa käytetyin pistoketyyppi. Latausvirta on korkeintaan 63 A, millä saavutetaan 43 kW latausteho. Latausjärjestelmän tiedonsiirtoväylän avulla säädelään latausvirtaa tarpeen mukaan. (Korhonen et al. 2019; SESKO 2021)

Lataustapa 4, Mode 4

Lataustapa 4 on niin sanottu teholataus. Siinä sähköauton akustoa ladataan tasasähköllä ja latausvirta voi olla satoja ampeereita ja tehot 50–350 kW. Latauspistokkeena käytetään standardin SFS-EN 62196-3 mukaista pistoketyyppiä AA "CHAdeMO" tai pistoketyyppiä FF "CCS2" (Kuva 2). Tasasähkölataus on yleinen etenkin täyssähköautoissa, koska se kykenee erittäin suuriin lataustehoihin, mikä lyhentää suurikapasiteettisten akkujen latausaikaa. (Korhonen et al. 2019)



Kuva 2. Pistoketyypit CHAdeMO ja CCS2. (Paul Sladen 2017)

3 SÄHKÖAUTON SYTTYMINEN JA PALAMINEN

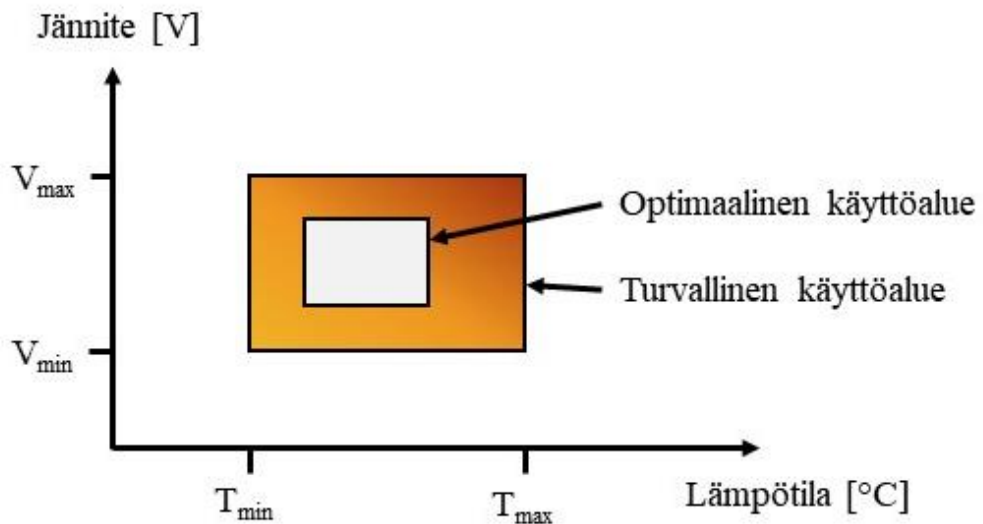
Viimeisen vuosikymmenen aikana sähköautojen määrä on kasvanut merkittävästi litiumakkuteknologian kehityksen siivittämänä ja niihin tavoitellaan yhä pidempiä toimintamatkoja. Tämän vuoksi niihin asennetaan yhä korkeamman energiakapasiteetin akustoja, mikä luo vakavasti otettavan turvallisuushan etenkin litiumakuissa havaitun palovaaran takia. Akkujen energiatiheyttä pyritään jatkuvasti kasvattamaan ja niiden latausta tavoitellaan aina vain nopeammaksi, joten akuston lämmönhallinnan on myös kehityttävä jatkuvasti. Sähköautojen käytön lisääntymisen myötä myös niiden lataaminen lisääntyy, mikä lisää omat huolensa sähköautojen paloturvallisuuteen liittyen etenkin kotitalouksissa lataamisesta. (Sun et al. 2020; Linja-aho 2021a)

Sähköauton paloriskiinkin vaikuttaa käytetty akkutyyppe ja sen koko. Täyssähköautoissa käytetään suuria litiumionikenoista koostuvia akkupaketteja, joissa on suuri palokuorma ja mahdollinen vaurio yksittäisessä kennossa voi edetä nopeasti akkupaloksi. Litiumioniakut ovat herkkiä ali- ja ylilataukselle, sekä liian matalille ja korkeille lämpötiloille. BMS suorittaaakin yleensä lämpötilamittausta sekä kennokohtaista jännitteenmittausta, jotta se voi reagoida mahdollisiin poikkeamiin nopeasti. Ladattavien hybridien akkupaketit ovat täyssähköautojen akustoja pienempiä, joten niiden akustojen palokuorma on huomattavasti pienempi. Ei-ladattavissa hybrideissä puolestaan käytetään yleensä nikkelimetallihybridiakkuja (NiMH), jotka eivät ole niin herkkiä yli- ja alilataukselle, joten kennokohtaista jännitteenseurantaa ei tarvita. (Wang et al. 2019)

3.1 Litiumioniakun palo ja lämpöryntäys

Sähköautojen paloturvallisuushuoli kohdistuu lähinnä litiumioniakkuihin, sillä muiden akkutyyppe kohdalla ei ole havaittu yhtä suurta paloriskiä. Sähköautoille tavoitellaan jatkuvasti pidempää toimintamatkaa ja akkupakettien kapasiteetti kasvaa. Jotta akuston massa ei nouse liikaa pyritään sen energiatiheyttä kasvattamaan, jolloin lämmönhallinta vaikeutuu. Niin kuin polttomoottoriautoissa polttoaine ruokkii autopalaa, myös akun sisältämän energian määrä vaikuttaa sähköautopalon suuruuteen ja pitkäkestoisuuteen. (Sun et al. 2020)

Litiumioniakulle (LIB) määritetään turvallisen käyttöjännitteen ja -lämpötilan ikkuna (kuva 3), jonka sisällä pysyttäessä akun käyttö on turvallista ja paloriski minimaalinen. Kuitenkin, jos jostain syystä turvalliselta käyttöalueelta poistutaan, voi akussa alkaa kemiallisten reaktioiden sarja, jonka seurauksena akku syttyy tuleen. (Bisschop et al. 2019)



Kuva 3. Havainnekuva LIB-kennon turvallisen käyttöjännitteen ja -lämpötilan alueesta. (mukaillen Bisschop et al. 2019)

Yksittäisessä LIB-kennossa voi liian korkean lämpötilan tai jännitteen seurauksena syntyä kemiallisia eksotermisiä reaktioita, jotka alkavat tuottaa lisää lämpöä. Mikäli eksotermiset reaktiot tuottavat enemmän lämpöä, kuin sitä ehtii vapautua, tapahtuu niin kutsuttu lämpöryntäys (thermal runaway). Lämpötila kennossa nousee hyvin nopeasti, mikä aiheuttaa viereisissä kennoissa nopean lämpenemisen ja ne syttyvät myös palamaan. Syntyy ketjureaktio, jonka myötä voi pian palaa koko akusto. Palaminen aiheuttaa voimakasta savunmuodostusta, suihkuliekkejä ja palavia kipinöitä. Jos kaasua muodostuu kennoista enemmän, kuin sitä ehtii akkupaketin varoventtiilistä, kuoren halkeamasta tai muusta aukosta vapautua, voi koko akkupaketti räjähtää. (Yoo et al. 2017; Bisschop et al. 2019)

LIB-kennon lämpöryntäys voidaan jakaa neljään vaiheeseen:

1. Alkuvaihe

SEI-kerroksen (Solid Electrolyte Interface) hajoaminen alkaa noin 80 °C:ssa. Itselämpeneminen on tässä vaiheessa noin 0,2 °C/min.

2. Kiihtymisvaihe

Lämpötilan noustessa 110 °C litioitu anodi alkaa reagoida elektrolyytin orgaanisten liuottimien kanssa, aiheuttaen palamiskelpoisia hiilivetykaasuja. Samalla myös erotin alkaa sulaa lämpötilan noustessa yli 125 °C, mikä aiheuttaa sisäisen oikosulun ja lisää itselämpenemistä.

3. Karkaamisvaihe

Lämpötilan noustessa yli 140 °C alkavat katodin materiaalit hajota. Reaktioissa vapautuu happea. Korkeamman akun varaustason on havaittu vaikuttavan lisäävästi happea muodostumiseen. Elektrolyytin orgaaniset liuottimet alkavat hajota 180 °C:ssa eksotermisillä reaktioilla.

4. Palaminen

Elektrolyytin liuottimien saavuttaessa itsesyttymislämmön 427 °C, palaa se vapautuvan hapen läsnä ollessa. Niiden leimahduspiste on vain -3 °C, joten ne voivat syttyvät myös leimahduspistettä huomattavasti matalammassa lämpötilassa kipinän, liekin tai sähkökaaren vaikutuksesta. Myös kiinteät materiaalit kuten muovit palavat lämpötilan noustessa hyvin korkeaksi. (Bisschop et al. 2019)

3.2 Akuston syttymissyöt

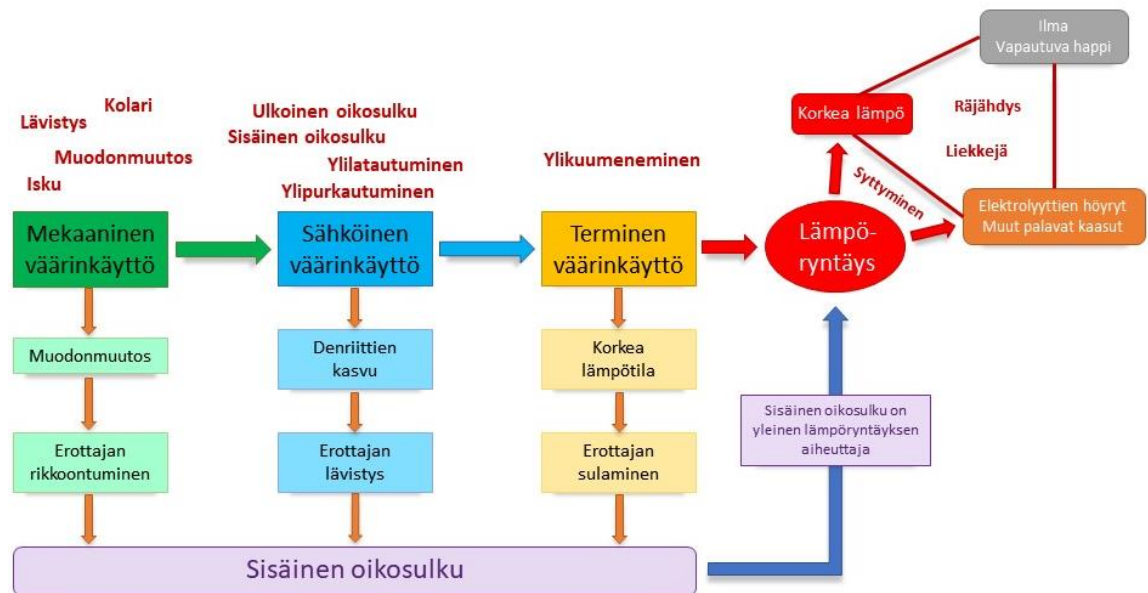
Sähköautot eivät lähtökohtaisesti ole herkkiä itsesyttymiselle tarkoituksenmukaisessa käytössä ja niiden turvallisuusjärjestelmien suunnittelu on hyvin kehittyntä, mikä vähentää itsesyttymisen riskiä omalta osaltaan. Kuitenkin on olemassa joukko riskitekijöitä, joille altistuva sähköauton litiumioniakusto, voi aiheuttaa kennossa vaurion, joka johtaa lämpöryntäykseen. Syy vaurioon voi olla akkupaketin tai yksittäisen kennon suunnittelu- tai valmistusvirhe tai mekaaninen, sähköinen tai termien väärinkäyttö, mikä voi olla joko käyttäjän tai jonkin ohjausjärjestelmän aiheuttamaa. Kuvassa 4 on havainnollistettu lämpöryntäykseen johtavia tekijöitä. (Bisschop et al. 2019)

3.2.1 Sisäinen ja ulkoinen oikosulku

Sisäinen oikosulku tarkoittaa tilannetta, jossa akkukennon elektrodien välille on vaarallisin akkupalon aiheuttaja ja se voi tapahtua äkillisesti ilman mitään varoituksia aiheuttaen vakavaa vahinkoa. Kenno purkaa energiansa oikosulun kautta tuottaen paljon lämpöä ja lähialueen nopea lämmitys voi laukaista viereisissä kennoissa myös lämpöryntäyksen. Kuitenkaan sisäinen oikosulku ei johda lämpöryntäykseen, vaan sen herkkyys riippuu muun muassa akun varaustasosta, oikosulussa olevien osien resistiivisyydestä ja lämmön poistumisesta kennolta. (Bisschop et al. 2019)

Sisäinen oikosulku voi tapahtua, kun valmistusvirheen tai fyysisen kuormituksen seurauksena katodin ja anodin materiaalit koskettavat toisiaan tai erotinmateriaali vaurioituu. Kuva 4 havainnollistaa, kuinka mekaaninen, sähköinen kuin terminen vaurio johtaa usein sisäiseen oikosulkuun, mitä seuraa lämpöryntäys. (Bisschop et al. 2019)

Ulkoinen oikosulku on toinen merkittävä akustoa vaurioittava sähköinen tapahtuma. Akuston napojen kytkeytyvät toisiinsa, aiheutuu hetkellisesti suuri virtapiikki, jolloin kennot alkavat lämmitä vapauttaen kaasuja. Reaktioiden etenemiseen ja nopeuteen kennossa vaikuttavat akuston turvaominaisuudet ja sen kyky haihduttaa lämpöä. Lämpöä vapautuu myös kennojen ulkopuolella, kun johtimet kuumenevat, mikä vähentää yksittäisen kennon lämpökuormitusta. Siihen, seuraako ulkoista oikosulkua lämpöryntäys, vaikuttaa hyvin paljon oikosulun ajallinen kesto. Ulkoisen oikosulun voi aiheuttaa tilanne, jossa akusto altistuu mekaaniselle muodonmuutokselle, iskulle, vedelle tai korroosiolle tai sen johtimet koskettavat toisiaan kolarin tai huoltovirheen seurauksena. (Bisschop et al. 2019)



Kuva 4. Lämpöryntäyksen aiheutuminen litiumioniakussa. (mukailien Wang et al. 2019)

3.2.2 Mekaaninen vaurio

Sähköautoissa käytettävät akkukennot ovat varsin herkkiä mekaaniselle rasitukselle ja iskuille ja ne joutuvat autossa melko suurten rasitusten ja kiihtyvyyksien alaiseksi. On myös olennaista ottaa huomioon, että kuten minkä vain muunkin auton, on sähköautonkin mahdollista joutua liikenneonnettomuuteen. Tästä syystä akkupaketti on hyvin suojattu ja omaa itsessään vahvan kotelon. Lisäksi akusto sijoitetaan yleensä autoissa vahvan rungon ja koteloinnin sisään sekä yleensä lähelle pohjaa painopisteen madaltamisen takia. (Sun et al. 2020)

Vaikka sähköauton on mahdollista olla osallisena liikenneonnettomuudessa, suojauksen ansiosta suurin osa törmäyksistä ei kuitenkaan vahingoita akkua. Suuren törmäysenergian liikenneonnettomuuteen jouduttaessa on kuitenkin vaarana, että akustoon kohdistuva mekaaninen muodonmuutos, isku tai lävistävä vaurio voi aiheuttaa akustoon sisäisen tai ulkoisen oikosulun tai palavien sekä sähköä johtavien nesteiden vuotamisen. Myös pohjaan kohdistunut voimakas isku esimerkiksi kiveen ajettaessa voi aiheuttaa akuston vaurion. (Bisschop et al. 2019; Sun et al. 2020)

Kuten kohdassa 3.2.1 mainittiin, lämpöryntäyksen käynnistyminen oikosulku tapauksessa riippuu monesta tekijästä, kuten elektrodien välisestä kontaktista, lämmöntuotosta ja akuston varaustasosta. (Bisschop et al. 2019)

3.2.3 Ylilatautuminen ja -purkautuminen

Nopean latauksen ja purkamisen tavoittelu yhdistettynä korkean ajokokemuksen tavoitteluun lisää litiumioniakuston paloriskiä. Ne on suunniteltu ottamaan vastaan ja purkamaan vain tietty määrä energiaa aikayksikköä kohden, minkä ylittäminen voi alentaa niiden suorituskykyä ja aiheuttaa ennenaikaisen vikaantumisen. Lisäksi niille on määritelty turvallisen käytön takaamiseksi vähimmäis- ja enimmäiskapasiteetti, joiden välissä akuston lataustason (SOC) tulisi pysyä. Tätä vaihteluväliä kutsutaan nimelliskapasiteetiksi ja sitä kuvataan välillä 0–100 %. Nimelliskapasiteetin ylittäminen tai alittaminen voi vaurioittaa akustoa. (Bisschop et al. 2019; Sun et al. 2020)

Ylilatauksessa anodimateriaali litioituu liikaa ja sille alkaa muodostua metallista litiumia ikään kuin sormiksi, jotka riittävästi kasvaessaan voivat puhkaista erottimen aiheuttaen sisäisen oikosulun. Katodilla päinvastaisesti litium vähenee niin, että katodi alkaa hajoamaan termisesti tuottaen lämpöä. Ylilatausta voi aiheuttaa, kun latauksenhallintajärjestelmä ei tunnista kennojännitettä oikein, latausjärjestelmä on epäkunnossa tai käytetään väärän tyyppistä laturia. (Bisschop et al. 2019)

Litiumakkua purettaessa litiumionit virtaavat anodilta katodille. Kun akkua puretaan alle nimelliskapasiteetin, kutsutaan sitä ylipurkautumiseksi tai syväpurkautumiseksi. Yleisin syy ylipurkautumiselle on itsepurkautuminen, mikä on akkujen tavanomainen ominaisuus pitkään varastoitaessa. Siksi pitkään varastoitavaa akkua on syytä ajoittain ladata. (Bisschop et al. 2019)

Akun purkautuessa alle -10 % SEI-kerros alkaa hajota anodilla vapauttaen kaasuja muun muassa hiilidioksidia ja vetyä, mikä johtaa paineen kasvuun kennossa. Jos purkautuminen jatkuu alle -12 % nimelliskapasiteetista, anodin kuparinen virrankeräin alkaa hapettua ja sähköä johtavia kuparihiukkasia liukenee elektrolyyttiin. Kuparihiukkaset läpäisevät erottimen ja alkavat kiinnittyä katodille muodostaen virtaa johtavan sillan elektrodien välille. Aiheutuu sisäinen oikosulku, joka voi johtaa lämpenemisen myötä lämpöryntäykseen. Jos akkua ladataan ennen, kun se on päätynyt sisäiseen oikosulkuun, muodostuu SEI-kerros anodille uudelleen. Katodille päässeeseen kuparin muodostama kerros ja hajotessaan muotoansa muuttanut kuparinen virrankeräin heikentävät akun suorituskykyä. (Guo et al. 2016; Bisschop et al. 2019)

Tavanomaisessa ja tarkoituksenmukaisessa käytössä ei ylilatautumista ja -purkautumista pitäisi tapahtua, koska sähköautojen akunhallintajärjestelmä (BMS) on suunniteltu estämään monipuolisesti vikatilanteita ja vaurioita. Auton akustoa ei esimerkiksi voi ajaa alle nimelliskapasiteetin alarajan, sillä BMS katkaisee virransyötön. Kuitenkin valmistus- ja suunnitteluvirheet sekä viat ohjausjärjestelmissä voivat johtaa jopa itsesyttymiseen ja lämpöryntäykseen. (Bisschop et al. 2019; Sun et al. 2020)

3.2.4 Liian matala ja korkea lämpötila

Sähköautojen litiumioniakut on suunniteltu toimimaan tavanomaisissa sääolosuhteissa, niin korkeissa kuin matalissakin lämpötiloissa. Litiumioniakuston optimaalinen toimintalämpötila on 20–40 °C. Lämpötilan noustessa käynnistää BMS akuston jäähdytyksen. Yleensä akustot ovat neste- tai ilmajäähdytteisiä. Puolestaan kylmää akustoa lämmitetään lämmityselementeillä, jotta vältetään akuston vaurioittamiselta. (Bisschop et al. 2019; Wang et al. 2019)

Ongelmia lämpenemisen kanssa voi tulla, kun akuston jäähdytys pettää tai ympäröivän ilman lämpötila on akun lämpötilaa korkeampi etenkin, kun akun jäähdytys perustuu ympäröivän viileämmän ilman hyödyntämiseen. Kun akun lämpenee liikaa, alkaa kennoissa eksotermisiä hajoamisreaktioita. Akusto lämpenee entisestään, mikä voi aiheuttaa lämpöryntäyksen kennoissa. Lämmitessään litiumiokenno vapauttaa myös syttyviä ja myrkyllisiä kaasuja, joita vapautuu kennon turva-aukosta. Ilmaan sekoittuessaan voivat kaasut räjähtää vakavin seurauksin. (Larsson et al. 2018; Bisschop et al. 2019)

Sähköauton akusto voi altistua myös ulkoiselle tulipalolle esimerkiksi sähköauton palaessa ilman, että akusto on vielä osallistunut paloon. Lämpö voi palon jatkuessa päästä akkupakettiin sisälle ja aiheuttaa kennoissa lämpöryntäyksen. Tämän riskin vähentämiseksi sähköautojen on läpäistävä UNECE Reg. Nro 100 -palonkestävyydesti, jossa akkua lämmitetään avotulella 130 sekunnin ajan. Tämän jälkeen akun pintalämpötilaa tarkkaillaan ja sen on kolmen tunnin aikana jäähdyttävä ympäristön lämpötilaan tai laskettava koko tarkkailun ajan. Testi voidaan suorittaa koko sähköautolle tai pelkälle akkupaketille. (Anon. 2015; Bisschop et al. 2019)

Kylmissä olosuhteissa esimerkiksi alle 0 °C etenkin akun lataaminen voi vaurioittaa akustoa, jos sitä ei kyetä lämmittämään ennen latausta. Kylmässä kennossa litiumionien liike katodilta anodille ja kiinnittyminen anodiin muuttuu niin, että ne voivat alkaa muodostua metalliseksi litiumiksi, mikä voi johtaa sisäiseen oikosulkuun. (Bisschop et al. 2019)

Lähtökohtaisesti Suomen viileämmät sääolot ovat litiumioniakuille suotuisia ja se hidastaa akkujen kalenteri-ikäntymistä. Kalenteri-ikäntyminen on ajokilometrejä merkittävämpi akuston kapasiteetin alentaja. Litiumioniakkujen kapasiteetti alenee ajan saatossa, vaikka sillä ajettaisiin hyvin vähän vuosittain, mutta viileät olosuhteet hidastavat ikääntymistä. (Korhonen et al. 2019)

3.3 Latauksen aiheuttama paloriski

Sähköautojen yleistyessä myös lataukseen liittyvät turvallisuusriskit on syytä huomioida litiumioniakustojen riskien rinnalla. Aktiivisesti käytössä olevan ladattavan auton lataus käyttää suuria virtoja pitkiä aikoja päivittäin vuoden ympäri. Sähkö- tai hybridi-auton lataaminen on myös tavallisessa kotitaloudessa yhä yleisempää. Muihin kotitalouden sähköverkkoon liitettäviin sähkölaitteisiin nähden ladattava auto on poikkeuksellisen kuormittava, eivätkä vanhempien talojen tai muuten huonokuntoiset sähköasennukset ole riittäviä, mikä aiheuttaa huomionarvoisen paloriskin. (Linja-aho 2021a)

Kun kotitalouspistorasiaa eli maadoitettua sukopistorasiaa käytetään lataukseen, ongelma muodostuu siitä, ettei sitä ole tarkoitettu pitkäjaksoiseen kuormitukseen suurella virralla. Vaikka pistorasia olisi mitoitettu esimerkiksi 16 A virralla, on havaittu, että pitkään mitoitusvirralla ladattaessa etenkin vanhan pistorasian kuluneet ja hapettuneet kosketuspinnat sekä sähköasennusten heikkokuntoiset liitokset voivat ylikuumentua aiheuttaen palovaaran. Toinen riski etenkin vanhoissa taloissa voi olla se, että pistorasialle johtava kaapeli kulkee talon eristeiden sisässä, missä se voi kuumentua voimakkaasti. (Linja-aho 2021a, Anon. 2021b)

Paloriskin vähentämiseksi vuonna 2016 vahvistettu standardi SFS-EN 62752 edellyttää Suomessa myytävien ladattavien autojen sukolatausjohtojen maksimivirraksi 8 A pitkäkestoisessa latauksessa. Paloriskin välttämiseksi sähköauton lataajan olisi myös

hyvä tarkastaa lataukseen käyttämänsä pistorasia ja siihen liittyvät asennukset. Turvallisinta ja suositeltavin tapa ladata autoa kotitaloudessa olisi asentuttaa kiinteästi sähköverkkoon liitettävä latausasema, jota asentaessaan ammattilainen tarkastaa myös, riittääkö sähköverkon mitoitus. Lisäksi latausasema mahdollistaa myös yli 8 A virralla lataamisen. (Linja-aho 2016)

4 SÄHKÖAUTOJEN PALOT SUOMESSA

Sähköautojen paloturvallisuuteen liitetään yleisesti monenlaisia uhkakuvia. Kuitenkaan ei ole selvää näyttöä, että ne olisivat polttomoottoriautoja herkempiä syttymään. On kuitenkin selvää, että sähköautojen paloriski on hyvin erilainen polttomoottoriautoihin nähden muun muassa siksi, että palo voi syttyä viiveellä mahdollisen väärinkäytön jälkeen. Polttomoottoriauto syttyy useimmiten ajossa, mutta puolestaan sähköautolle voi tapahtua niin sanotusti itsesytyminen pysäköitynä esimerkiksi latauksessa ollessaan. Suomessa sähköautokanta on kuitenkin verrattain uutta ja hyvin huollettua, mikä toistaiseksi auttaa pitämään sähköautojen palotilastoja kurissa. Sähköautojen määrän kasvaessa ja niiden ikääntyessä on todennäköistä, että myös palojen määrä kasvavaa. (Linja-aho 2020; Willstrand 2020)

4.1 Tilastot

Henkilöautojen tieliikennevälinepaloja on Suomessa vuosittain yli 1200. Kuten taulukko 1 osoittaa, niistä vain parissa on osallisena sähkö- ja hybridauto, mikä tarkoittaa sähköautopalojen olevan Suomessa vielä erittäin harvinaisia. Taulukko perustuu pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto Prontoon, minne kaikki pelastustoimen hälytystehtävät tilastoidaan. Tilastoitujen ajoneuvopalojen joukossa on kuitenkin mahdollista olla paloja, joissa osallisena on ollut sähkö- tai hybridauto, mutta tieto tästä on voinut jäädä kirjaamatta. (Linja-aho 2020)

Taulukko 1. Henkilö sekä sähkö- ja hybridautojen palotilastot 2015–2019

(mukaillen Linja-aho 2020)

Vuosi	Henkilöautojen palot yht.	Täyssähköautojen palot	Hybridautojen palot
2015	1303	0	1
2016	1320	0	2
2017	1242	0	0
2018	1296	1	2
2019	1275	1	2

Vuonna 2019 sähkö- ja hybridautoja oli kaikkiaan 87 997, joista täyssähköautoja 4661 ja yhteensä kaikkiaan henkilöautoja oli 2 720 307. Kun palomääriä suhteuttaa

kokonaisajoneuvomääriin, huomataan, että sähköä käytettäviä autoja palaa erittäin harvoin verrattuna muihin autoihin. Sähkö- ja hybridautoista paloi noin 0,34 per 10 000, vain täyssähköautoja noin 2,8 ja kaikkia henkilöautoja 4,69 per 10 000. (Linja-aho 2020)

Läheskään aina sähköauton palo ei ole akkupalo. Vuonna 2021 Brontoon on merkitty 12 liikennevälinepalon tehtäväkirjausta, jossa mainitaan sähkö- tai hybridauto. Niistä lähes kaikki ovat kuitenkin perinteisiä paloja, jotka eivät liittyneet käyttövoimaan mitenkään. Yksi selvästi korkeajännitejärjestelmään liittyvä tapaus on kuitenkin kirjattu vuonna 2021, kun ladattavan hybridin konetilassa syttyi palo kesken ajon. Akkupaloksi tapahtumaketju ei kuitenkaan edennyt sillä palo oli auton keulalla ja akusto takaosassa. (Linja-aho 2022)

Sähköautopalot ovat pelastustoimelle haastavia ja voivat sitoa henkilöstöä pitkän aikaa uudelleensyttymisen tai sen riskin vuoksi. Keväällä 2019 lahtelaisen autoliikkeen pihassa latauksessa ollut sähköauto oli alkanut savuta. Palokunnan tullessa paikalle auton pohjan alta tuli runsaasti vaaleaa savua ja heidän yrittäessä hinata sitä kauemmas rakennuksesta ja muista autoista, syttyi se tuleen. Paloa sammutettiin ja akustoa jäähdytettiin useista suunnista, kunnes savunmuodostus oli lakannut ja akuston lämpötila laskenut. Pian palokunnan poistuttua kohteesta auto syttyi uudelleen. Palokunta palasi paikalle ja sammutti jälleen aggressiivisen palon. Paikalle jäi palon sammumisen jälkeen yksi palomies jälkivartioon, joka havaitsi pian auton syttyneen kolmannen kerran. (Puranen 2019)

4.2 Sähköautojen paloriskit tulevaisuudessa

Sähköautojen määrä kasvaa merkittävästi seuraavan parin vuosikymmenen ajan. Liikenne- ja viestintäministeriön toimenpide-ehdotuksessa asetetaan tavoitteeksi vähentää fossiilisia polttoaineita käyttävien ajoneuvojen käyttöä ja lopulta päättää bensiini ja dieselkäyttöisten autojen myynti vuonna 2035. Tavoitteeksi asetetaan 670 000 sähköautoa vuonna 2030 ja 2 miljoonaa sähköautoa 2045. (Särkijärvi et al. 2018)

Suomessa sattuu liikenneonnettomuuksia vuosittain keskimäärin noin 15 000 (Taulukko 2). Vaikka litiumioniakku itsessään on melko herkkä mekaaniselle kuormitukselle ei Suomessa yhdessäkään vuosien 2015–2019 aikana tilastoiduista liikenneonnettomuuksista kuitenkaan johtanut akkupaloon onnettomuuspaikalla eikä

korjaamalla. Voidaan siis todeta, että myös kolarin aiheuttamat sähköautopalot ovat edelleen hyvin harvinaisia. Sähkö- ja hybridautojen lisääntymisen myötä on todennäköistä, että myös yhä useampi litiumioniakun sisältävä auto on osallisena liikenneonnettomuudessa, mikä tarkoittaa, että riski sähköautojen syttymiseen on olemassa vielä tulevaisuudessa. (Linja-aho 2020)

Taulukko 2. Tieliikenneonnettomuudet vuosittain 2016–2020

(mukailten Lopenen and Liukkonen 2022)

	2016	2017	2018	2019	2020
Tieliikenneonnettomuudet	14 038	14 909	14 621	16 595	15 065

Sähköautojen lataus kotitalouksissa on tulevaisuudessakin huomion arvoinen sähköautoihin liittyvä paloriski. Vaikka 2016 vuonna vahvistettu standardi edellyttää pitkäkestoisessa latauksessa suko-pistorasiasta käytettäväksi 8 A, jonka on arvioitu riittävän matalaksi virraksi kotitalouksien sähköverkolle, on silti olemassa suko-latauslaitteita, joista latausvirta on mahdollista asettaa yli 8 A latausvirroilla ja mahdollisuus erittäin huonokuntoisiin kytkentöihin ja pistotulppien kosketuspintoihin. Riskinä pidetään myös omakotiasujien omia sähköasennuksia ilman pätevyyskiä ja sekä kellokytkimien, mittarien ja jatkoroikkien käyttöä latauksen yhteydessä. Latauksen aiheuttamia paloja ei toistaiseksi Suomessa ole dokumentoitu, joten latauslaitteen ja käytettävän sähköverkon aiheuttamaa paloriskiä voi sanoa hyvin pieneksi. (Linja-aho 2020, 2021a)

5 SAMMUTUS- JA PELASTUSTYÖ

Sähkö- ja hybridautojen yleistyminen tieliikenteessä asettaa pelastusalan uuden haasteen eteen. Akkupalo on harvinainen, mutta pahimmissa skenaarioissa hyvinkin arvaamaton ja tuhoisa, ja sen sammuttaminen on usein haasteellista. Sähköautot ovat Suomessa verrattain uusi ilmiö pelastustoimen näkökulmasta. Vaikka akateemisia tutkimuksia on ehditty tehdä runsaasti sähköautojen paloihin liittyen, ei tietämys niiden kanssa toimimisesta ole vielä riittävällä tasolla pelastushenkilöstön keskuudessa. Sammutusmenetelmissä ja sammuttamiseen käytettävässä välineistössä riittää siis vielä kehitettävää. (Puranen 2019)

5.1 Sammutusmenetelmät

Palavan sähkö- ja hybridauton sammutustyö etenee pääpiirteittäin samalla tavalla kuin tavallisen polttomoottoriautonkin sammutus. Jos autossa on uhreja, pelastetaan ne välittömästi hätäsiirrolla, minkä jälkeen aloitetaan sammutus. Jos sähköauton auton akusto ei osallistu paloon, itse sammuttaminen ei eroa polttomoottoriauton sammuttamisesta, mutta akuston jäädyttäminen on suositeltavaa lämpöryntäyksen ehkäisemiseksi. Jos akuston havaitaan palavan, on huomioitava useita asioita, jotta palo saadaan sammutettua ihmisille ja ympäristölle turvallisesti. Varautuminen akkupalon sammutukseen hyvissä ajoin edellyttää, että auton tiedetään olevan sähkö- tai hybridauto, tai tunnistus kyetään tekemään itse. (Delaunay and Cardou 2020)

Litiumioniakusta itsestään löytyy kaksi kolmesta palamiseen tarvittavista elementistä lämmöstä, hapesta ja palavasta aineesta: akun lämmitessä tapahtuvat kemialliset reaktiot vapauttavat happea ja sen elektrolyytistä vapautuvat hiilivedyt ovat herkästi palavia kaasuja. Näin ollen akkupalo kykenee ylläpitämään itseään hapettomissakin oloissa. Sähköauton akkupaketissa voi olla vahvan suojauksen sisässä satoja palavia kennoja, joten myöskään palavan aineen poistaminen palosta ei ole varteenotettava vaihtoehto. Ainoa tehokas keino akkupalon ketjureaktion katkaisuun on siis palon jäädyttäminen. (Välitalo 2019)

Kun sähkö- tai hybridauto palaa, riippumatta siitä osallistuuko akusto paloon, aloitetaan sammuttaminen ensin etäämpää pyrkien sammuttamaan liekkipalo ja estäen palon leviämistä esimerkiksi vieressä oleviin autoihin tai rakennuksiin. Autoa lähestytään mieluiten etuviistosta välttämällä suoraan auton taakse tai eteen suihkuliekkien tai räjähdysten mahdollisuuden takia. Akuston jäähdyttäminen aloitetaan mahdollisimman pian ja se on suositeltavaa, vaikka akusto itsessään ei olisi paloon osallistunut. Kun toimitaan lähempänä autoa, on syytä varoa akulta mahdollisesti tulevia suihkuliekkejä, roiskeita ja myrkyllisiä savukaasuja. Jos auton akustolle on ns. sammutusluukkuja ruiskutetaan niistä vettä runsaasti suoraan kennoille. Jos luukkuja tai aukkoja ei akustolle ole, ruiskutetaan vettä akuston suuntaan useista eri suunnista sinne, mistä sen oletetaan jäähdyttävän kennoja. (Bisschop et al. 2019; Delaunay and Cardou 2020)

Vesi on toistaiseksi käytetyistä sammutusaineista varteenotettavin litiumioniakkujen sammutukseen huolimatta sen mahdollisista haitoista ehjille sähköpiireille. Vesi on halpaa ja sillä on korkean lämpökapasiteettinsa ansiosta tehokas jäähdytysvaikutus, joka hidastaa lämpöryntäyksen etenemistä ja ehkäisee uudelleensyttymiseltä. Vesi myös tunkeutuu akuston kennoille paremmin kuin jotkin suuremman viskositeetin omaavat sammutteet. Se kuitenkin muodostaa suuria määriä myrkyllistä HF-kaasua reagoidessaan elektrolyytin litiumsuolan kanssa sekä herkästi syttyvää vetyä reagoidessaan litiumin kanssa. (Wang et al. 2019)

On myös olemassa joukko muita sammutteita, joita voidaan soveltaa akkupalon sammutukseen, kuten halonit, heptafluoripropaani, C6F-ketoni, ABC-jauhe ja CO₂. Wang totesi kokeissaan tutkimusryhmänsä kanssa näiden aineiden jäähdytystehon jäävän kuitenkin huomattavasti vettä alhaisemmaksi. Ne eivät suoraan kykene pysäyttämään lämpöryntäystä, mutta voivat sammuttaa liekkipalon ja siten alentaa akun pintalämpötilaa vähentäen lämmön siirtymistä ehjiin kennoihin. (Wang et al. 2019)

Eräs varsin hyväksi todettu akuston sammutus- ja jäähdytysmenetelmä on siirrettävä vesitiivis vaihtolava tai kontti, jonne palanut sähköauto nostetaan ja joka täytetään vedellä niin, että akusto peittyy kokonaan veden alle. Menetelmä mahdollistaa veden tehokkaan tukeutumisen kennoille ja siten erinomaisen jäähdytysvaikutuksen. Yleistyvien teknologioiden sähköturvallisuudesta väitöskirjatutkimusta kirjoittava Vesa Linja-aho pohtii artikkelissaan kontin käytössä akkupalon sammutukseen olevan myös huonoja

puolia. Hänen mukaansa veteen upottaminen ei ratkaise ongelmaa, vaan siirtää sitä, koska auto voi syttyä uudelleen myöhemmin, kun vesi lasketaan pois, sillä vesi on voinut aiheuttaa oikosulkuja paikoissa, missä sitä ei ennen upottamista ollut. Lisäksi akusto- ja palokemikaalien saastuttama vesi on kuljetettava käsiteltäväksi ongelmajätteenä. Pelkästään sammutusletkulla runsaalla vedenkäytöllä ei Linja-ahon mukaan veteen tartu niin paljon kemikaaleja. Samaan johtopäätökseen pääsi Fire Protection Research Foundation -tutkimusryhmä tutkimuksissaan. Vain puhdasta vettä käytettäessä sammutusvesi oli vain hieman happamampaa ja sisälsi vain vähän kloridia ja fluoria. (Välitalo 2019; Linja-aho 2021b)

Yksi mahdollisuus sähköautopalon sammutukseen voisi olla jonkinlainen sammutuspeite, joka voitaisiin vetää auton yli. Vaikka peite sammuttaisi liekkipalon, se ei silti kykene jäähdyttämään paloa ja pysäyttää lämpöryntäystä. Suomessa Marko Hassisen, Juha Laitisen ja Jari Mikkosen kehittämässä sammutuspeitteessä on jäähdytysominaisuus huomioitu asentamalla peitteeseen liitin paloletkulle ja useita suuttimia, joilla saadaan aikaan jäähdyttävä vaikutus peitteen sisään. Lisäksi peite on kaasutiivis ja sen sisään jäävät myrkylliset savut voidaan suodattaa ilmasta. Tuote palkittiin vuonna 2021 Palosuojelurahaston innovaatiopalkinnolla. (Puranen 2021)

Toisinaan harkittu ja hallittu loppuun poltto itsesammumiseen asti voisi olla vartenotettava vaihtoehto esimerkiksi, jos sammuttaminen on haasteellista esimerkiksi resurssien tai veden puutteen vuoksi. Tällöin on kuitenkin varmistettava, ettei palo sytytä muuta palavaa materiaalia ympäriltään. On myös syytä harkita aiheuttavatko palosta aiheutuvat myrkylliset kaasut enemmän haittaa palopaikan ympäristössä. (Välitalo 2019)

5.2 Ongelmat akkupalojen sammutuksessa

Yksi merkittävimpiä haasteita sähköauton akkupalon sammuttamisessa on veden saaminen akustolle, sillä akkupaketit on usein huolella suojattu iskujen ja muodonmuutosten varalta. Akustot sijaitsevat myös usein hankalassa paikassa, yleensä auton pohjassa takapenkkien alla taka-akselin kohdalla. Jotkin autonvalmistajat ovat kuitenkin tehneet palossa aukeavia sammutusluukkuja, joista on mahdollista saada vettä suoraan akkukennoille. (Delaunay and Cardou 2020)

Palava litiumioniakku voi olla hyvin arvaamaton ja sen sammuttaminen lähietäisyydeltä voi olla turvallisuusriski. Litiumioniakun eksotermisissä reaktioissa syntyy kaasuja, jotka nostavat kennon sisäistä painetta ja purkautuessaan voivat aiheuttaa suihkuliekkejä, jotka voivat sisältää muun muassa sulaa metallia sisältäviä heitteitä, jotka voivat polttaa reikiä sammutusasuun. Äärimmäisissä tapauksissa kenno voi repeytyä tai räjähtää heittäen kappaleita suurella nopeudella. On myös mahdollista, että akustosta vapautuu palamiskelpoisia kaasuja, jotka eivät heti pala, vaan sekoittuvat ilmaan. Kun sopiva kaasu-ilma-seos viimein syttyy voi seurauksena olla kaasuräjähdyks. (Larsson et al. 2018; Delaunay and Cardou 2020)

Sähköautopalo voi sitoa pelastusviranomaisia pitkäksi aikaa. Paitsi, että palon sammuttaminen on haastavaa ja voi vaatia aikaa jopa tunteja, voi se syttyä uudelleen jopa vuorokauden jälkeen. Vaikka akusto vaikuttaisi sammuneelta voivat sisäiset oikosulut ja yksittäisissä kennoissa käynnissä olevat eksotermiset reaktiot aiheuttavat akuston uudelleensyttymisen. Tämän takia sammutettu auto on syytä siirtää paikkaan, jossa mahdollinen uudelleensyntyminen ei aiheuta haittaa. Myös jälkivartion järjestäminen voi olla tarpeellista, jotta uudelleensyttymiseen voidaan reagoida heti. (Wang et al. 2019; Delaunay and Cardou 2020)

Kuten ajoneuvopalossa aina, on ilmaan vapautuvilta altisteilta suojauduttava hyvin sammutusasulla ja paineilmalaitteella. Tämä korostuu etenkin sähköautopaloissa, sillä litiumioniakunpalosta vapautuu palavien kaasujen lisäksi useita myrkyllisiä kaasuja, kuten häkää (CO), kloorivetyä (HCl) ja fluorivetyä (HF), ympäristöön. Häkä on erittäin helposti syttyvä ja hengitettynä sillä on hengenvaarallinen tukehduttava vaikutus. HCl ja HF ovat terveydelle erittäin vaarallisia kaasuja. Merkittävimmän haitan aiheuttaa HF, jota muodostuu tappavia määriä, kun litiumin suola LiPF₆ reagoi veden tai kosteuden kanssa. HF imeytyy ihmiskehoon paitsi keuhkojen myös ihon kautta. Tästä syystä sammutusvarusteiden höyrynläpäisevyyteen ja altistusaikaan palon läheisyydessä on syytä kiinnittää huomiota, jotta asun läpäisisi mahdollisimman vähän myrkyllisiä altisteita. Paineilmalaitteita tulee ehdottomasti käyttää vaara-alueen sisäpuolella myös jälkisammutusvaiheessa, jotta keuhkoja ei altisteta hengenvaarallisille kaasuille. (Larsson et al. 2018; Väitalo 2019)

Erityisen vaativia ovat sähköautopalot, jotka tapahtuvat maan alaisissa tai muissa suljetuissa tiloissa. Tiloissa oleskelussa ja sammutustyössä on kiinnitettävä huomiota työturvallisuuteen, erityisesti palon kaasunmuodostukseen, sillä vaarallisten yhdisteiden pitoisuus ilmassa on suhteessa paljon suurempaa kuin avoimessa ympäristössä palavan sähköauton tapauksessa. Palon saavuttaminen voi viedä aikaa mahdollisesti sokkeloisen tilan ja pitkien selvitysmatkojen takia. Kun palo on saatu hallintaan ja akusto jäähdytettyä on tarpeellista saada palanut sähköauto pois suljetusta tilasta avoimeen ympäristöön uudelleen syyttymisriskin vuoksi. (Suosalo 2020)

Sähkö- ja hybridauton akustossa voi liikenneonnettomuuden seurauksena vaurioitua myös niin, että sen lämpöryntäys sytyttää akuston viiveellä pelastushenkilöstön toimiessa jo auton ympäristössä. Tästä syystä sähkö- ja hybridauton varhainen tunnistaminen onnettomuus ja palopaikalla on varautumisen kannalta tärkeää, mutta joskus se voi olla haastavaa, sillä ulkoisia tunnusmerkkejä ei välttämättä ole. Yleisiä sähkö- tai hybridauton tunnusmerkkejä ovat latauspistokkeet sekä tekstimerkinnot ja symbolit, joiden yhteydessä käytetään myös usein sinistä väriä. Täyssähköauton tunnistaa myös pakoputken puutteesta. Auton rekisteriotteessa mainitaan kuitenkin aina auton käyttövoima. (Delaunay and Cardou 2020)

6 YHTEENVETO

Sähköautopalot Suomessa ovat edelleen melko harvinaisia, ja sähkö- ja hybridautoja voidaan pitää varsin paloturvallisina yleisistä ennakkoluuloista huolimatta. Tilastoissa on vain kourallinen tapauksia, joissa sähköauto on syttynyt ajoakustosta. Palojen määrään vaikuttaa varsin uusi autokanta ja on oletettavaa, että määrät tulevat kasvamaan sähköautojen vanhetessa. Sähköautojen kokonaismäärä kasvaa hurjaa vauhtia, mikä osaltaan vaikuttanee palotilastoihin, kun sähköautojen osallisuus esimerkiksi vakavissa liikenneonnettomuuksissa oletettavasti kasvaa. Tarkkojen palotilastojen saaminen on haasteellista, sillä sähköauton osallisuutta liikennevälinepaloon välttämättä aina ei kirjata tarkasti pelastustoimen tilastoihin.

Toisaalta sähköautojen paloturvallisuuteen panostetaan teollisuudessa paljon ja ne suunnitellaan siten, etteivät ne tarkoituksenmukaisessa käytössä syty itsekseen palamaan. Keskeinen paloturvallisuuteen vaikuttava laite on akustonhallintajärjestelmä, joka hallitsee sähköauton virrankäyttöä ja ohjaa akuston latausta tarkkaillen samalla jännitteitä jopa kennotasolla. Se mittaa myös akuston lämpötilaa ja tarpeen mukaan jäädyttää tai lämmittää sitä. Myös sähköautojen akuista kehitetään jatkuvasti paloturvallisempia muun muassa rakenteellisilla ratkaisuilla ja kehittämällä paloturvallisempia akkukemioita.

Väärinkäytön tai jonkin järjestelmän tai komponentin suunnittelu- tai valmistusvirheen myötä on kuitenkin mahdollista, että litiumioniakussa käynnistyy lämpöryntäys, jonka seurauksena kennoista vapautuneet kaasut syttyvät palamaan aiheuttaen aggressiivisen palon.

Vaikka sähköautopalot ovat huomattavasti polttomoottoriauton paloa harvinaisempia, ovat ne pelastustoimelle erittäin haastavia tilanteita. Sähköautot ovat Suomessa uusi ilmiö, minkä takia kokemusta ja osaamista niiden sammuttamisesta on varsin vähän. Vaikka sammutustyö ei suuresti eroa tavallisesta autopalon sammuttamisesta, on akuston arvaamaton toiminta palotilanteessa huomioitava. Olennainen ero tavalliseen paloon on tarve saava auton akusto jäähtymään lämpöryntäyksen pysäyttämiseksi. Tätä kuitenkin vaikeuttaa akun sijainti ja sitä ympäröivä suojarakenne. Veden on kuitenkin todettu olevan siihen paras sammutusaine ja runsaalla vedenkäytöllä saadaan aikaan riittävä sammutusvaikutus. Sähköauto voi myös syttyä uudelleen jopa kymmenien tuntien päästä.

Litiumioniakuston palo aiheuttaa runsaasti myrkyllisiä kaasuja, joita palopaikan lähetyvillä voi olla jopa tappavia määriä. Pelastajien paloasuun ja hengityksen suojaukseen on kiinnitettävä erityisesti huomiota, sillä myrkylliset kaasut voivat pitkäkestoisessa altistuksessa päästä paloasunkin läpi. Erityisesti ongelmana ovat palot suljetuissa tiloissa kuten maanalaisissa parkkihalleissa.

Eräs sähköautojen paloturvallisuuteen liittyvä asia on lataus. Julkisista latauspisteistä ja oikein kotitalouteen asennetuista latausasemista sähköauton lataaminen on lähtökohtaisesti paloturvallista. Ongelma voi muodostua, kun akustoa ladataan toistuvasti pitkiä aikoja kotitalouspistorasiasta suurella virralla. Etenkin, jos lataukseen käytettävä pistorasia tai sähköasennusten liitokset ovat vanhoja ja heikkokuntoisia, voi jokin liitos kuumeta niin, että aiheuttaa lopulta tulipalon.

Lopultakin voisi todeta, että sähköauton käyttö on varsin turvallista ja sen syttyminen hyvin epätodennäköistä tarkoituksenmukaisessa käytössä. Paloturvallisuus on myös jatkuvassa kehityksessä. Myöskään lataus ei aiheuta paloriskiä, kun se suoritetaan asianmukaisesti asennetusta standardit täyttävästä latauslaitteesta ja kotitalouksissa verkon riittävyys on varmistettu. Paloja tulee kuitenkin olemaan tulevaisuudessa ja niiden tehokkaaseen ja turvalliseen sammuttamiseen käytettäviä menetelmiä ja välineitä on hyvä kehittää.

LÄHTEET

- Anon., 2021. *Kestävä liikenne ja liikkuminen, Sähköautot* [online]. Motiva. Available from: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot [Accessed 3 Apr 2022].
- Anon., 2015. *Regulation No 100 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train [2015/505]* [online]. Publications Office of the European Union. Available from: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fd8e6b47-d767-11e4-9de8-01aa75ed71a1> [Accessed 5 May 2022].
- Anon., 2021. Sähköauton lataussuositus. [online], 5. SESKO. Available from: <https://sesko.fi/standardointi/sahkoautot-ja-latausjarjestelmat/lataussuositus/> [Accessed 6 May 2022].
- Bisschop R., Willstrand O., Amon, F. and Rosengren M., 2019. *Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles*. RISE report 2019. Boras, Sweden: RISE Research Institute of Sweden. ISBN 978-952-7217-54-2
- Delaunay S. C. and Cardou C. S., 2020. Palokunnan toimintakäsikirja - Ajoneuvoja koskeviin hätätilanteisiin vastaaminen, suomennos Saastamoinen Mikko. [online]. Available from: <https://godr.sdis86.net/godr/godr-sr-fi/index.html> [Accessed 1 Apr 2022].
- Ehsani M., Gao Y., Longo S. and Ebrahimi, K., 2018. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Third Edition*. ISBN 978-1-4987-6177-2
- Guo R., Lu L., Ouyang M. and Feng X., 2016. Mechanism of the entire overdischarge process and overdischarge-induced internal short circuit in lithium-ion batteries. *Scientific Reports*, 6.

- Korhonen E., Orrberg M., Korhonen E., Linja-aho V., Mäkinen J., 2019. *Sähköautot ja latausjärjestelmät*. Espoo: Sähköinfo Oy. ISBN 978-952-231-269-3
- Larsson F., Bertilsson S., Furlani M., Albinsson I. and Mellander B. E., 2018. Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing. *Journal of Power Sources*, 373, 220–231.
- Linja-aho V., 2016. Sähköautoon kotipistorasiasta jatkossa vain 8 ampeerin virtaa. *etn.fi* [online]. Available from: <https://etn.fi/index.php/13-news/5562-sahkoautoon-kotipistorasiasta-jatkossa-vain-8-ampeerin-virtaa> [Accessed 6 May 2022].
- Linja-aho V., 2020. Hybrid and Electric Vehicle Fires in Finland 2015-2019. In: *Fires in Vehicles (FIVE)*.
- Linja-aho V., 2021a. *Kiinteistöjen sähköasennusten paloturvallisuus sähköautoja ladattaessa* Teoksessa: Puustinen A. *Pelastus- ja turvallisuustutkimuksen vuosikirja 2021*. Kuopio: Pelastusopisto. S. 28–45. ISBN 978-952-7217-46-7
- Linja-aho V., 2021b. Entä jos sähköauto syttyy tuleen? *ETN* [online]. Available from: <https://etn.fi/index.php/opinion/12167-enta-jos-sahkoauto-syttyy-tuleen> [Accessed 31 May 2022].
- Linja-aho V., 2022. *Sähköautojen akkupalot ovat erittäin harvinaisia* | *ETN* [online]. Available from: <https://etn.fi/index.php/13-news/13001-sahkoeautojen-akkupalot-ovat-erittaein-harvinaisia> [Accessed 14 May 2022].
- Loponen T. and Liukkonen, H., 2022. *Pelastustoimen taskutilasto 2016–2020*. ISBN 978-952-7217-54-2
- Manuel Stephan A. and Nahm K. S., 2006. Review on composite polymer electrolytes for lithium batteries, 47 (16), 5952–5964.
- Matulka R., 2014. *The History of the Electric Car* | *Department of Energy* [online]. Available from: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car> [Accessed 31 Mar 2022].

- Puranen K., 2019. Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa. *Pelastustieto* [online]. Available from: <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikea-sammuttaa/#a3908cf7> [Accessed 30 Mar 2022].
- Puranen K., 2021. Sähköautopalon myrkyt jäävät nyt sammutuspeitteeseen. *Pelastustieto* [online]. Available from: <https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/kalusto/sahkoautopalon-myrkyt-jaavat-nyt-sammutuspeitteeseen/#8f6e52a5> [Accessed 31 May 2022].
- Särkijärvi J., Jääskeläinen, S. and Lohko-Soner, K., 2018. Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045 Liikenteen ilmastopolitiikan työryhmän loppuraportti. [online]. Available from: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161210/LVM_13_18_Toimenpideohjelma%20hiilettomaan%20liikenteeseen%202045%20Liikenteen%20ilmastopolitiikan%20tyoryhman%20loppuraportti.pdf?sequence=1&isAllowed=y [Accessed 24 Mar 2022].
- Sharma S., Panwar A. K. and Tripathi M. M., 2020. Storage technologies for electric vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7 (3), 340–361.
- Sun P., Bisschop R., Niu H. and Huang X. 2020. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire Technology*.
- Suosalo J., 2020. Pelastuslaitoksen varautuminen sähköautopaloihin maanalaisissa pysäköintilaitoksissa. [online]. Hämeen ammattikorkeakoulu. Available from: <https://www.theseus.fi/handle/10024/344835?show=full> [Accessed 22 May 2022].
- Välitalo T., 2019. *Firefighting in case of Li-Ion battery fire in underground conditions: Literature study* [online]. Available from: <https://cris.vtt.fi/en/publications/firefighting-in-case-of-li-ion-battery-fire-in-underground-condit> [Accessed 25 Apr 2022].

Wang Q., Mao B., Stoliarov S. I. and Sun J., 2019. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 73, 95–131.

Willstrand O., 2020. *A lower risk of fire with electric cars?* [online]. RISE. Available from: <https://www.ri.se/en/our-stories/a-lower-risk-of-fire-with-electric-cars> [Accessed 14 May 2022].

Yoo K., Banerjee S., Kim J. and Dutta P., 2017. A review of lithium-air battery modeling studies. *Energies* [online], 10 (11). Available from: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/11/1748> [Accessed 12 Apr 2022].