



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Kari Kultanen

Sähköautojen paloturvallisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

8.12.2019

Tekijä Otsikko	Kari Kultanen Sähköautojen paloturvallisuus
Sivumäärä Aika	32 sivua 8.12.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Jälkimarkkinointi
Ohjaaja	Lehtori Vesa Linja-aho
<p>Tässä insinööriyössä selvitettiin sähköautojen paloturvallisuutta kokonaisuutena, kirjallisuuskatsauksen muodossa. Työn tarkoituksena oli laatia katsaus siitä, mistä sähköauton tulipaloriskit muodostuvat ja millä tasolla sähköautojen paloturvallisuus on tällä hetkellä sekä olisiko sitä syytä parantaa. Työssä pyrittiin myös vertaamaan sähköauton ja polttomoottoriauton eroavaisuuksia paloturvallisuuden suhteen.</p> <p>Kirjallisiin lähteisiin perustuvassa työssä esitellään lyhyesti yleistä tietoa sähköautoista sekä paneudutaan hieman syvällisemmin sähköautojen akkuihin ja niihin liittyviin järjestelmiin, sillä ne ovat merkittävimpiä tekijöitä sähköauton tulipaloriskin kannalta. Työssä esitellään myös muutama sähköauton tulipaloja ja niihin liittyviä seikkoja.</p> <p>Tiedonhakuun on käytetty suurimmilta osin internetlähteitä, sillä niiden koettiin sopivan hyvin aiheen tutkimiseen ja ajantasaista tietoa oli hyvin saatavilla.</p> <p>Lopputuloksena on sähköautojen paloturvallisuutta käsittelevä kompakti katsaus, joka tuo esille aiheen kannalta tärkeimpiä tekijöitä.</p>	
Avainsanat	sähköauto, litiumioniakku, paloturvallisuus

Author Title	Kari Kultanen Fire Safety of Electric Vehicles
Number of Pages Date	32 pages 8 December 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Automotive After Sales Engineering
Instructors	Vesa Linja-aho, Senior Lecturer
<p>This thesis examines the fire safety of electric cars. The objective was to create an overview that describes factors related to the risks of fire concerning electric cars, discusses the current fire safety of electric cars and if there is a need to improve it. The aim was to also point out differences between electric cars and cars with internal combustion engines in terms of fire safety.</p> <p>First the basics of electric cars are introduced. After that the batteries and related accessories of electric cars are discussed, as those are the most relevant components concerning the fire safety of electric cars. There are also a few examples of electric car fire incidents with causes and consequences presented.</p> <p>The thesis was carried out using mostly internet sources as that was thought to fit the purpose and up-to-date information was accessible.</p> <p>The result is a compact overview of fire safety of electric cars, presenting relevant factors associated with the topic.</p>	
Keywords	electric car, lithium-ion battery, fire safety

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköauto	1
2.1	Perusteet	1
2.2	Kehityksen aikajana	2
2.3	Sähköauton vahvuudet	3
2.4	Määrä Suomessa ja maailmalla	4
3	Sähköauton akku	5
3.1	Litiumioniakku	5
3.1.1	Yleiset ominaisuudet ja soveltuvuus ajoneuvokäyttöön	5
3.1.2	Perusrakenne ja toiminta	7
3.1.3	Kennotyypit	8
3.1.4	Hallintajärjestelmät	10
3.2	Akun sijoittelu	12
3.3	Suojaus	13
3.4	Esimerkkikokoonpanoja	14
3.4.1	Tesla Model S 85 kWh	14
3.4.2	Tesla Model 3 Long range	15
3.4.3	BMW i3	15
3.4.4	Nissan Leaf	16
4	Sähköauton tulipaloriski	17
4.1	Tulipalon syyt	17
4.2	Riskit kolarin jälkeen	18
5	Sähköauton tulipalotapahtumia	19
5.1	Teslan pohjaan kohdistuneet iskut	19
5.2	Latauksessa olleiden sähköautojen paloja	20
5.3	Itsestään syttyminen	21

5.4	Syttyminen kolarin seurauksena	21
5.5	Pohdintaa	22
6	Vertailua polttomoottoriautoon	23
6.1	Tulipaloriskin aiheuttajat	23
6.2	Tilastoja ja pohdintaa	23
7	Pohdintaa	26
	Lähteet	28

Lyhenteet

BMS	Battery Management System, akunhallintajärjestelmä
TMS	Thermal Management System, lämmönhallintajärjestelmä
kWh	Kilowattitunti, energian yksikkö
Li-ion	Litiumioni
SoC	State of Charge, latauksen taso

1 Johdanto

Sähköautojen paloturvallisuus on noussut askarruttavaksi kysymykseksi sähköautojen yleistyessä ja mediassakin esille tulleiden rajujen sähköautopalojen seurauksena. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kirjallisten lähteiden pohjalta perehtyä sähköautojen paloturvallisuuteen ja tutkia siihen liittyviä kysymyksiä. Aluksi tutustutaan sähköautojen perusteisiin yleisellä tasolla sekä tekniikan osalta. Hieman syvällisemmin paneudutaan aiheen kannalta tärkeimpiin osa-alueisiin.

Työssä käydään läpi muutamia tulipaloja, joissa sähköauto on ollut osallisena. Tulipaloista selvitetään, mitä on tapahtunut, mistä palo on saanut alkunsa, mitkä ovat siihen vaikuttavia tekijöitä ja mitä toimenpiteitä tulipalon jälkeen mahdollisesti tehtiin. Työssä selvitetään myös hieman, miten sähköautot vertautuvat paloturvallisuuden kannalta perinteisiin polttomootoriautoihin: kumpi näistä on mahdollisesti tilastollisesti paloturvallisempi vaihtoehto ja mitkä asiat tähän vaikuttavat.

Tavoitteena on muodostaa ajatus siitä, millä tasolla sähköautojen paloturvallisuus on tällä hetkellä ja onko paloturvallisuuden eteen vielä syytä tehdä parannuksia, kun sähköautoja verrataan jo pitkään käytössä olleisiin ja riittävän turvallisiksi todettuihin polttomootoriautoihin.

Työssä käsitellään henkilöautoluokan autoja ja sähköautolla viitataan täyssähköautoon, ellei toisin mainita.

2 Sähköauto

2.1 Perusteet

Sähköauto on auto, jonka voimanlähteenä on tutun polttomoottorin sijaan yksi tai useampi sähkömoottori. Sähköauto saa käyttöenergiansa akusta, joten auton akkua pitää ladata akun varaustason mukaan. Voimalinjan osalta sähköautot ovat yksinkertaisia,

sillä ne eivät vaadi vaihteistoa tai kytkintä. Sähkömoottori voi olla suoraan tai alennusvaihteen välityksellä kytköksissä vetoakseliin, ja nelivetomalleissa autossa on moottorit edessä ja takana, joten tarvetta kardaanille ei ole. Sähkömoottoreita ohjataan sähkövirralla. [1, luku 1.2.]

2.2 Kehityksen aikajana

Ensimmäiset käytännölliset sähköautot tehtiin 1800-luvun lopulla. Tuolloin sähköauton kilpailijoina olivat höyry- ja polttomoottoriautot. Sähköautojen etuina kilpailijoihin verrattuna olivat muun muassa käytön helppous, luotettavuus ja hajuttomuus. Sähköauto oli suorituskyvyltäänkin kilpailukykyinen, mutta tuolloin tiet olivat huonot ja ajomatkat lyhyitä, joten siihen aikaan hyvin vaatimattomatkin ominaisuudet olivat riittävät. [2]

Sähköautot olivat yleisesti käytössä 1900-luvun kahtena ensimmäisenä vuosikymmenenä, mutta kehittyvä tieverkosto toi mukanaan olosuhteet, joissa autolta vaadittiin pidempiä ajomatkoja ja suurempia nopeuksia. Tuolloin sähköautoilu kaatui pitkälti sähkötekniikan puutteellisuuteen, sillä polttoaineen sisältämä suuri energiamäärä mahdollisti polttomoottoriauton ylivoimaisuuden muuttuneissa olosuhteissa. Polttomoottoriautojen suosiota vauhditti käynnistinmoottorin keksiminen. Ford aloitti massatuotannon ja polttomoottoriautojen hinnat laskivat sellaiselle tasolle, että paljon kalliimpi ja ominaisuuksiltaan heikompi sähköauto ei enää ollut miltään kantilta järkevä vaihtoehto. [1, luku 1.1.1; 2.]

Vasta 2000-luvulla sähköautot ovat taas nousseet suosioon, kun autoihin on toden teolla alettu kehittämään ympäristöystävällisempiä voimanlähteitä. Tähän on vaikuttanut myös erittäin vahvasti se, että akkuteknologia on kehittynyt tarpeeksi korkealle tasolle, jotta sähköauto voisi ylipäättään vastata kuluttajien tarpeisiin. Muutoin katseet olisivat kääntyneet johonkin muuhun käyttövoimaan. [1, luku 1.1.3.]

Sähköautoilla saavutetaan nykyään jo satojen kilometrien toimintamatkoja yhdellä latauksella, mikä riittää suurimmalle osalle kuluttajista päivittäisiin ajoihin. Akkujen lataus on myös jo suhteellisen nopeaa varsinkin sähköautovalmistajien pikalatausmahdollisuuksilla, joten auton lataaminen kesken matkan pienen tauon lomassa ei ole mahdoton vaihtoehto.

Paljon pitkää matkaa ajaville sähköautojen toimintamatka ja latausnopeus eivät välttämättä vieläkään ole tyydyttävällä tasolla, mutta niiden eteen tehdään jatkuvasti tutkimustyötä, ja esimerkiksi latausnopeus on kehittynyt paljon lähivuosien aikana. Monille sähköauto tarjoaa kuitenkin täysin riittävät ominaisuudet jo nykyisellä tasollakin, mutta suurimmaksi kompastuskiveksi muodostuu sähköauton korkea hinta verrattuna polttomoottoriautoon.

2.3 Sähköauton vahvuudet

Sähköautolla on monia vahvuuksia verrattuna polttomoottoriautoon. Niiden moottorit ovat käytännössä huoltovapaita, eikä käyttäjän tarvitse olla tekemisissä öljyn tai polttoaineen kanssa. Sähköautot ovat todella hiljaisia ja ajomukavuutta lisää sähkömoottorien tarjoama huippuvääntö heti liikkeellelähdistä alkaen. Käyttäjän näkökulmasta katsottuna sähköautoa voisi kutsua idioottivarmaksi, sillä autoa on hankala väärinkäyttää. Polttomoottorille ja sen voimansiirrolle sen sijaan saattaa tehdä hallaa tietämättäänkin.

Sähköauto on potentiaalisesti huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin polttomoottoriauto, mutta tähän vaikuttaa paljon se, miten akkuihin siirretty sähköenergia on tuotettu. Sähköntuotto on kuitenkin pikkuhiljaa siirtymässä enemmän uusiutuviin lähteisiin ja ympäristöystävällisyys onkin yleinen syy sähköautojen suosioon.

Mikäli akkuteknologia vielä kehittyy merkittävästi, on sähköautolla potentiaalia olla ominaisuuksiltaan parempi polttomoottoriautoon verrattuna. Tämä perustuu yhteen sähköauton tärkeimmistä ominaisuuksista eli energiatehokkuuteen. Sähkömoottorin paremman hyötysuhteen lisäksi polttomoottoriautossa on suuremmat voimansiirtohäviöt vaihteiston takia. Tämä tarkoittaa sitä, että samalla määrällä energiaa sähköautolla päästään paljon pitempi matka kuin polttomoottoriautolla. [1, luku 11.1.]

Otetaan esimerkissähköautoksi Tesla Model S 85 kWh:n akulla. Yhdellä latauksella maantienopeudella 100 km/h autolla voi päästä jopa 450 kilometriä [3]. Tämä tarkoittaa sitä, että 450 kilometrin matkaan on kulunut akun kapasiteetin verran eli 306 megajoulea energiaa.

Toiseksi esimerkiksi otetaan bensiiniauto, jonka keskikulutus nopeudella 100 km/h on 5 l / 100 km, eli bensiiniautoksi voidaan puhua jopa pienestä kulutuksesta. Samassa 450 kilometrin matkassa bensiiniä palaisi 22,5 litraa. 95E10-bensiinissä on energiaa 30,9 megajoulea litraa kohden [4, s. 22.]. Matkaan siis kuluu 695,25 megajoulea energiaa, yli kaksinkertainen määrä verrattuna sähköautoon.

2.4 Määrä Suomessa ja maailmalla

Suomessa oli vuonna 2018 liikennekäytössä 2404 kappaletta sähköautoja. Kokonaisuudessaan henkilöautoja oli liikennekäytössä 2 696 334 kappaletta. Sähköautojen osuus kaikista henkilöautoista oli siis noin 0,09 %. Vuonna 2017 sähköautoja oli 1449, kun henkilöautoja oli yhteensä 2 668 930 kappaletta. Sähköautojen osuus oli siis noin 0,05 %. [5] Sähköautojen osuus on kasvussa, ja markkinanäkymästä päätellen kasvu tulee jatkumaan lähivuosina kovaa vauhtia. Suomessa sähköautojen osuus on kuitenkin vielä melko vaatimattomalla tasolla.

Norjassa sen sijaan oli vuoden 2018 lopussa yhteensä 2 718 000 henkilöautoa, joista peräti 7,17 % oli sähköautoja. Se tarkoittaa hieman alle 200 000 kappaletta sähköautoja. [6] Norjassa onkin korkeampi sähköautojen osuus kuin missään muualla maailmassa. Suosion selittää pitkälti valtion massiivinen tuki sähköautoiluun.

Maailmanlaajuisesti henkilöautoja on arvioiden mukaan reilu miljardi. Vuonna 2018 näistä noin 5 miljoonaa on arvioitu olevan ladattavia sähköautoja [7]. Puhutaan siis noin 0,5 %:n osuudesta maailmanlaajuisesti.

3 Sähköauton akku

Sähköauton akun tehtävänä on varastoida auton käyttöön tarvittava energia. Akku on monella tapaa sähköauton merkityksellisin komponentti, sillä sen ominaisuudet ja sijoittelu määrittelevät pitkälti koko auton ominaisuudet ja potentiaalin, kuten esimerkiksi massa, toimintamatka, teho ja painopiste.

Sähköautoissa käytetään yleensä litiumioniakkuja. Voidaan todeta, että tällä hetkellä se on selvästi hallitseva akkutyyppejä sähköautomarkkinoilla, joten muita akkuja ei käsitellä sen enempää tässä työssä. Sähköauton akkupaketti koostuu yleensä moduuleista, jotka on muodostettu akkukennoista. Akkukennojen määrä riippuu valmistajasta sekä käytetystä akkukennorakenteesta.

3.1 Litiumioniakku

3.1.1 Yleiset ominaisuudet ja soveltuvuus ajoneuvokäyttöön

Litiumioniakut eli li-ion-akut ovat nykyisin yleisin akkutyyppejä elektroniikkalaitteissa, kuten puhelimissa ja kannettavissa tietokoneissa, sekä muissakin liikuteltavissa käyttökohteissa. Suosion on aiheuttanut elektroniikkalaitteiden kasvaneet energiatarpeet ja samalla tavoiteltu mahdollisimman kompakti olomuoto laitteen käytettävyyttä silmällä pitäen. Tähän litiumioniakut ovat olleet ratkaisu niiden korkean kennojännitteen ja energiatihetyensä ansiosta, mikä mahdollistaa pienten ja kevyiden akkujen valmistuksen. Monessa tapauksessa litiumioniakun korkea jännite mahdollistaa yksinkertaisen ja kustannustehokkaan yksikennoisen akun käytön, siinä missä esimerkiksi nikkeliakkukennoja pitäisi kytkeä kolme sarjaan saman jännitteen saavuttamiseksi. [8; 9]

Lyijy- tai nikkeliakkuja käytetään kuitenkin vielä käyttökohteissa, joihin niiden ominaisuudet sopivat paremmin ja joissa ne mahdollistavat kustannustehokkaamman ratkaisun. Esimerkiksi auton käynnistysakkuna käytetään edelleen lyijyakkua, sillä sen ominaisuudet sopivat hyvin tehtävään eikä akun suuremmalla painolla ole tässä tapauksessa oikeastaan mitään merkitystä.

Litiumioniakun tärkeimpiin vahvuuksiin kuuluu

- **korkea energiatiheys:** huomattavasti korkeampi energiatiheys verrattuna lyijy- tai nikkeliakkuihin
- **vähäinen itsepurkautuminen:** purkautuminen noin 1–2 % kuukaudessa
- **huoltovapaus:** ei tarvetta esimerkiksi ajoittaiseen tyhjäksi purkamiseen ja täydeksi lataamiseen kapasiteetin säilyttämiseksi.

Heikkouksia sen sijaan ovat

- **herkkyys:** akku menee helposti pilalle yli- tai alijännitteestä tai liian suuresta virrasta
- **ikäntyminen:** akun kapasiteetti laskee ajan ja lataussykliä mittaen
- **hintaa:** akku muodostaa suuren osan laitteen kokonaiskustannuksista.

Sähköautokäyttöön litiumioniakku on nykyhetkellä oikeastaan ainut kelvollinen vaihtoehto sen verrattain korkean energiatihetyensä ansiosta. Nykypäivän sähköautoissa saisi monien mielestä olla pidempi toimintamatka, mutta akustot painavat jo nyt satoja kiloja, siinä missä 50 litran tankillinen polttoainetta painaa alle 40 kilogrammaa [10]. Siirtyminen huonompaan energiatihetyteen tarkoittaisi joko entisestään lyhyempää toimintamatkaa tai vastaavasti merkittävää painon nousua. Koska nämä ominaisuudet ovat litiumioniakkuillakin hyvin vaatimattomalla tasolla, tulisi sähköautojen menestys kärsimään, jos niistä karsittaisi vielä enemmän.

Energiatihetyden lisäksi litiumioniakun huoltovapaus ja vähäinen itsepurkautuminen edesauttavat akun soveltuvuutta sähköautokäyttöön. Olisi hieman epäkäytännöllistä, jos auton akku vaatisi ajoittaisia huoltolatauksia tai akku purkautuisi merkittävästi itsestään. [8]

Sähköautokäytössä litiumioniakkujen merkittävimmät heikkoudet ovat sen herkkyys väärinkäytölle, ikäntyminen ja hinta. Litiumioniakku menee herkästi pilalle yli- tai alijännitteestä, liian suuresta virrasta tai lämpötilasta. Altistuessa väärinkäytölle akun kapasiteetti ja käyttöikä voi laskea dramaattisesti ja akusta voi tulla sisäisten kemiallisten muutosten

takia vaarallinen. Viallisen akkukennon käyttö voi johtaa lämpöryntäykseen eli hallitsemattomaan lämpötilan nousuun, mikä litiumioniakkujen tapauksessa johtaa käytännössä akun syttymistä tuleen. Lämpöryntäysilmiö alkaa kennon lämpötilan noustua liian korkeaksi yleensä oikosulun seurauksena, jolloin vapautuu energiaa, mikä edelleen nostaa lämpötilaa. Kyseessä on siis noidankehä. Litiumioniakkujen kanssa käytetään kuitenkin lähes poikkeuksetta jonkinlaista suojapiiriä tai akunhallintajärjestelmää (BMS), jolloin akut ovat turvallisia, niin kauan kuin järjestelmä toimii tai akkuihin ei kohdistu ulkoista vahinkoa. [11]

Litiumioniakut ikääntyvät sekä ajan, että syklien mittaan. Keskimäärin litiumioniakku kestää 500–1000 täyttä lataus-purkaussykliä, mikä korreloi sähköauton tapauksessa melko suoraan ajokilometreihin. Olkoon yhden latauksen toimintamatka esimerkiksi 300 kilometriä, 500 syklin jälkeen tämä tarkoittaa teoriassa 150 000:ta ajettua kilometriä. Akkujen kestoa voidaan kuitenkin parantaa käyttämällä akkua vajaalla kapasiteetilla, mikä tarkoittaa sitä, että akkua ei koskaan ladata täyteen tai kuluteta täysin tyhjäksi. Tämä tekniikka on yleisesti käytössä sähköautoissa. On myös olemassa kennotyyppejä, joilla saavutetaan pidempi elinikä. Esimerkiksi BMW i3 sähköautossa käytetyillä kennoilla saavutetaan jopa yli 3000 sykliä. [12; 23]

Mikäli akkuja jouduttaisiin auton elinikänä useinkin vaihtamaan, tulisi hinnasta suurempi ongelma, sillä sähköauton akku saattaa maksaa yhden polttomoottoriauton verran, ja sähköauton hinnastakin se muodostaa suuren osan. Voitaisiin sanoa, että tällä hetkellä akku saattaa olla sähköauton elinkaaren määrittelevä tekijä. Nykysähköautot ovat kuitenkin verrattain uusia tuotteita ja suurimmalla osalla on edelleen akkutakuut voimassa, joten akkujen ikääntymisen tuomia haasteita tai ongelmia ei vielä voida kuin spekuloida.

3.1.2 Perusrakenne ja toiminta

Litiumioniakun neljä peruskomponenttia ovat positiivinen elektrodi (katodi), negatiivinen elektrodi (anodi), elektrolyytti ja separaattori. Katodimateriaaleina käytetään erilaisia litiummetallioksiedeja, joista yleisimpiä ovat litiumkobolttioksidi (LCO), litiummangaanioksidi (LMO), litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC) ja litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA). Anodimateriaalina toimii yleensä grafiitti. Elektrolyytti muodostuu litiumsuo-loista orgaanisessa liuottimessa, kuten esimerkiksi etyleenikarbonaatissa.

Akussa elektrolyytti toimii litiumioneja johtavana aineena ja separaattori estää kontaktin anodin ja katodin välillä päästäten kuitenkin litiumionit läpi. Yksinkertaisuudessaan akun purkautuessa litiumionit kulkevat elektrolyytissä separaattorin läpi anodista katodiin ja ladattaessa toiseen suuntaan. Liikkeen aiheuttaa elektronien kulku positiiviseen potentiaaliin. [13, luku 3.]

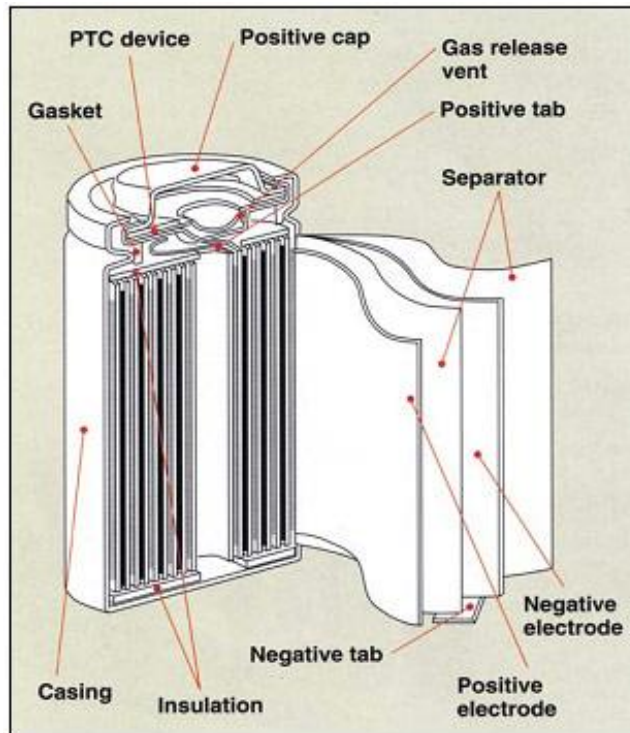
Litiumioniakuissa käytetään monia erilaisia kemiallisia yhdisteitä, joista muutamia yleisimpiä katodimateriaaleja mainitsin aiemmin. Kullakin kemiallisella yhdisteellä on omat vahvuudet ja heikkoudet, mutta tässä työssä ei kuitenkaan paneuduta akkukemioihin sen tarkemmin, sillä kaikkia sähköautokäytössä esiintyviä korkean energiatheyden omaavia akkukemioita koskevat paloturvallisuuden kannalta samat kynnyskysymykset.

3.1.3 Kennotyypit

Litiumioniakuissa esiintyy yleensä kolmea erilaista kennotyyppiä, joista jokaista tavataan sähköautojen akuissa. Niitä ovat sylinterikennot, prismaattiset kennot ja pussikennot. Eri kennotyypit sisältävät käytännössä samat komponentit, mutta ne on pakattu eri muotoon.

Sylinterikemno on nimensä mukaisesti sylinterin muotoinen. Kennossa anodi, katodi ja separaattori on rullattu sylinterin muotoiseen metalliseen kuoreen (kuva 1). Kennon toisessa päässä on positiivinen napa ja toisessa negatiivinen. Muotonsa ansiosta kemno on rakenteeltaan vahva ja se kestää hyvin myös sisäistä painetta. Sylinterikennot eivät turpoa, minkä ansiosta niillä on hyvä syklinen kestävyys. Sylinterikemnoissa on yleensä ylipaineen varalle myös paineenpäästömekanismi. Mekanismi voi olla kertakäyttöinen, jolloin akusta tulee käyttökelvoton paineen purkauduttua tai se voi olla uudelleensuljetavissa oleva venttiili.

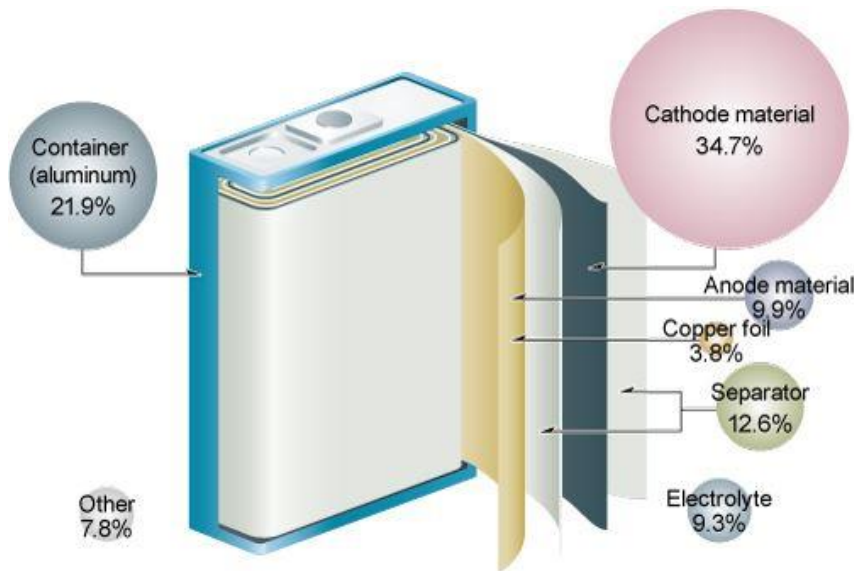
Usein sylinterikemnoissa käytetään myös PTC-kytkintä (Positive thermal coefficient) eli ylikuumenemis- tai oikosulkusuojaa. Kuumetessaan PTC-kytkin menee virtaa johtamattomaan tilaan, jolloin virrankulku kemnossa katkeaa, ja viiletessään se palautuu johtavaksi. Liika kuumeneminen aiheutuu liian suuresta virrasta, mikä taas aiheutuu yleensä oikosulusta.



Kuva 1. Sylinterikennon rakenne [14]

Sylinterikentöjen yleisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi sähkötyökalut ja kannettavat tietokoneet. Yleisin sylinterikentötyyppi on 18650, jonka nimitys tulee kentön mitoista. Sen halkaisija on 18 mm ja pituus 65 mm. Niitä käytetään myös Teslan Model S -sähköauton akustossa. Sylinterikentön vahvuuksia ovat helppo valmistus ja kestävä kuori. Haittapuolina kentö on painava ja muotonsa takia huono pakkaustiheys, mikä tarkoittaa sitä, että akustoihin jää väistämättä hukkatilaa kentöjen väliin. [14]

Prismaattinen kentö taas on pakattu yleensä metalliseen kulmikkaaseen ohueen koteloon. Akkumateriaalit on voitu pyörittää litteään rullan muotoon tai kasata päällekkäin erillisistä liuskoista separaattorin mutkittellessa niiden välissä. Sylinterikentöistä poiketen prismaattisilla kentöillä (kuva 2) ei ole standardisoituja kokoja, vaan jokainen valmistaja suunnittelee omansa, usein suoraan käytettävään laitteeseen. Tästä syystä prismaattisen kentön valmistus saattaa olla kalliimpaa.



Kuva 2. Havainnekuva prismaattisen kennon rakenteesta [15]

Prismaattisia akkuja käytetään yleisesti esimerkiksi puhelimissa ja tableteissa. Sen tärkeimpiä vahvuuksia ovat tehokas tilankäyttö ja joustavat suunnittelumahdollisuudet. Haittapuolina muun muassa kalliimpi valmistus sylinterikennoon verrattuna, sekä huonompi syklinen kestävyys turpoamisesta aiheutuvan de-laminoinnin johdosta.

Pussikennossa materiaalit on laminoitu päällekkäin erillisistä liuskoista, ja nimensä mukaisesti kennon kuori on vain pussimainen rakenne. Tämä mahdollistaa kevyen rakenteen ja tehokkaan tilankäytön. Tukevan suojakuoren puuttuessa pussikennot ovat kuitenkin herkempiä ulkoiselle vahingolle ja niissä esiintyy turpoamista. Nämä tulee ottaa huomioon lopullisen koteloinnin suunnittelussa. Kennoille olisi suotavaa saada hieman ulkopuolista painetta, jotta ne eivät pääse vapaasti turpoamaan, mutta rakenteeseen on kuitenkin laskettava mukaan turpoamisvaraa. Pussikennoilla ei myöskään ole standardisoituja kokoja, mutta niiden valmistuskustannukset ovat pienemmät kuin prismaattisten kennojen. [14]

3.1.4 Hallintajärjestelmät

Viitaten aiemmin mainittuihin litiumioniakkujen heikkouksiin, niiden turvalliseen ja tarkoituksenmukaiseen käyttöön tarvitaan aina akustonhallintajärjestelmä eli BMS (Battery

Management System). BMS:n tehtäviin ajoneuvokäytössä kuuluu muun muassa jännitteen ja virran valvonta, lämpötilojen valvonta, kennojen balansointi, latauksen tason (SoC) arviointi ja suojaustoiminnot.

Poiketen monista akuista, litiumioniakkujen jännitekäyrä ei ole lineaarinen, mikä tuo haasteensa latauksen tason arviointiin ja sitä kautta kennojen balansointiin. Näissä onnistuminen on hyvin tärkeää akun optimaalisen käytön kannalta, mikä tässä tapauksessa näkyy suoraan sähköauton saavuttamassa toimintamatkassa sekä akkujen eliniässä. Mikäli kennot ovat latautuneet epätasaisesti, akun koko kapasiteetti ei ole käytettävissä. Balansoinnissa ja SoC:n arvioinnissa käytetään erilaisia laskennallisia algoritmeja, joissa käytetään hyödyksi esimerkiksi kennojen jännitettä ja virrankulkua.

Ajoneuvokäytössä BMS:n tärkein tehtävä on varmistaa akun tarkoituksenmukainen ja turvallinen käyttö. Mikäli kennoissa havaitaan haitallisia jännitteitä, virtoja tai lämpötiloja, täytyy niihin reagoida esimerkiksi alentamalla virrankulkua tai katkaisemalla se kokonaan. [16, luku 14.]

Akut ovat myös suhteellisen tarkkoja toimintalämpötilastaan. Akkujen optimaalisen suorituskyvyn takaamisen lisäksi lämpötilalla on suuri merkitys akun käyttöikäen ja turvallisuuden, joten ajoneuvokäytössä akustoissa on oltava jonkinlainen lämmönhallintajärjestelmä (Thermal Management System) jo ääriolosuhteidenkin takia.

Lämpötilan laskiessa kennon elektrolyytin johtavuus heikkenee, eli litiumionien liikkuminen elektrolyytissä vaikeutuu. Tämä tarkoittaa suoraan akun virrananto- ja vastaanotto-kykyjen heikkenemistä. Merkittävä muutos tapahtuu jo mentäessä alle nollan celsiusasteen. Yleensä lataus lopetetaan ja purkuvirtoja täytyy laskea lämpötilan saavuttaessa -10 celsiusastetta. -20 celsiusasteessa purkamisenkaan ei ole välttämättä enää mahdollista, sillä riippuen elektrolyytistä, sen johtavuus voi olla jo olematon. [13, luku 3.9.5.] Esimerkiksi Suomen talvessa kymmenien celsiusasteiden pakkaset eivät ole epätavallisia, joten talvella akut vaativat usein lämmitystä. Akkujen lämmitysenergia otetaan auton sähköjärjestelmästä, eli auton ollessa latauksessa osa laturin virrasta ohjautuu lämmitykseen. Mikäli laturin virrantuotto on rajallinen, lämmitykseen käytettävä virta on pois akkujen latauksesta. Jos auto ei ole laturissa, akkujen lämmitysenergia otetaan itse akuista.

Matalalla lämpötilalla on myös suora vaikutus akkujen turvallisuuteen. Lämpötilan las-
kiessa litiumin kyky liittyä anodiin latauksessa heikkenee, mistä seuraa litiumin kerrostu-
mista anodin pintaan. Kerrostuessaan litium voi muodostaa haarakkeita, jotka voivat pa-
himmillaan aiheuttaa sisäisen oikosulun niiden yltäessä katodiin. Ilmiö aiheuttaa myös
akun kapasiteetin laskua, sillä kerrostunut litium ei ole enää käytettävissä.

Liian korkea lämpötila vaikuttaa laskevasti akun elinikään tyypillisesti jo 40 celsiusas-
teesta ylöspäin. Litiumioniakun optimaalinen käyttölämpötila on siis tyypillisesti noin 20
– 40 celsiusasteen välillä. Lämmitys ja jäähdytys voi olla toteutettu monella eri tavalla
akustosta riippuen. Jäähdytykseen tehokkain vaihtoehto on auton ilmastointijärjestelmän
käyttäminen. Lämmitys voi olla toteutettu esimerkiksi lämmityselementeillä tai nestekier-
rolla. [16, luku 13.]

3.2 Akun sijoittelu

Sähköauton akku on yleensä sijoitettu auton pohjalle, sillä se on loogisin paikka suurelle
ja painavalle akustolle. Näin sijoitettuna akun tuoma huomattava lisäpaino saadaan ja-
kautumaan autoon tasaisesti ja mahdollisimman alas, jolloin auton painopiste saadaan
helposti haluttuun paikkaan tekemättä kasaa kompromisseja. Auton painopiste on hyvin
kriittinen osa auton ajo-ominaisuuksia ja siten myös auton turvallisuutta ajatellen, joten
se ei voi olla ihan missä sattuu.

Akun sijoittaminen auton pohjaan on myös tilankäytöllisesti tehokas ratkaisu, sillä siten
saadaan hyödynnettyä paljon muuten vaikeasti hyödynnettävää tilaa, kuten esimerkiksi
penkkien alukset ja erinäisiä pohjan muotoja, joiden täytteenä polttomoottoriautossa voi
olla esimerkiksi pakoputkisto. Akut suunnitellaan pääasiassa ohuiksi ja muotoilu hieman
vaihtelee tapauskohtaisesti.



Kuva 3. Nissan Leaf halkaistuna [17]

Yllä olevassa kuvassa näemme esimerkin siitä, kuinka akun sijoittelu ja muotoilu on toteutettu Nissan Leaf -sähköautossa. Penkkien alta paljastuva akkukotelo on oranssin värinen. Poikkileikkauksesta huomataan, että akkukoteloinnin ja matkustamon välissä on vielä erillinen peltikerros. Akkupaketti on rakennettu osittain pohjarakenteiden sisälle ja sen mahdollinen vaihto tapahtuu alakautta.

3.3 Suojaus

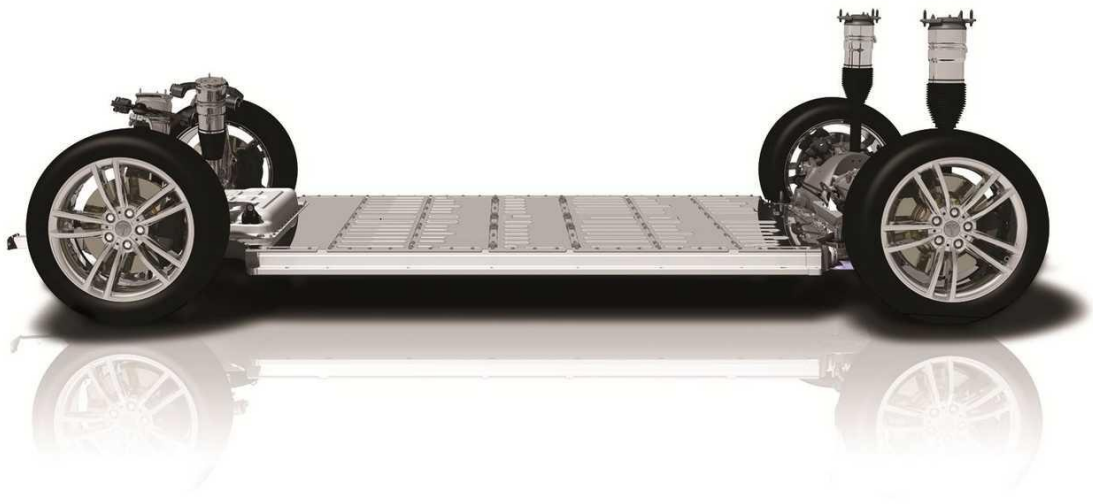
Haittapuolena akun sijoittelusta pohjan tuntumaan on akun alttius auton pohjaan kohdistuville iskuille. Iskun voi aiheuttaa esimerkiksi kivi tai jokin irrallinen esine tiellä, tai jokin onnettomuus. Pahimmassa tapauksessa isku voi aiheuttaa akun vahingoittumisen ja syttymisen tuleen. Akun voi kuitenkin suojata melko tehokkaasti erilaisilla panssareilla, jolloin akun vahingoittuminen iskusta on epätodennäköistä. Muista suunnista ulkoisia iskuja akkuun ei juuri pääse tulemaan.

Akkujen sähköteknisen suojauksen hoitaa BMS.

3.4 Esimerkkikokoonpanoja

3.4.1 Tesla Model S 85 kWh

Tesla Model S sähköauton 85 kWh kapasiteetin akkupaketissa on käytetty 7104 kappaletta Panasonicin valmistamia 18650-tyypin sylinterimallisia NCA litiumionikennoja. Teslan akkupaketti koostuu 16:sta erillisestä moduulista, joissa kussakin on 444 akkukennoa. Kennojen kytkentä toisiinsa yhdessä moduulissa on kuusi sarjaan ja 74 rinnan. Lopulta kaikki 16 moduulia on kytketty sarjaan, jolloin koko akkupaketti saavuttaa 375 voltin nimellisjännitteen. [18] Painoa yhdellä moduulilla on noin 25 kilogrammaa, eli yhteensä pelkät moduulit painavat jo noin 400 kilogrammaa [19, s. 13.]. Kokonaisuudessaan akusto koteloineen ja oheislaitteineen painaa noin 603 kilogrammaa [19, s. 3.].



Kuva 4. Tesla Model S akkupaketti [20]

Kuten kuvasta nähdään Teslan akkupaketti on suunniteltu erittäin litteäksi ja se on sijoitettu alimmaksi osaksi runkoa. Teslan akkupaketin vaihto onnistuu alakautta parhaimmillaan puolessatoista minuutissa. [21]

3.4.2 Tesla Model 3 Long range

Tesla Model 3 sähköautossa käytetty 75 kWh akusto sisältää yhteensä 4416 kappaletta Panasonicin valmistamia uudemman mallisia 2170-tyyppin litiumionisylinterikenoja. Kennot muodostavat neljä moduulia, joista kahdessa on 25 sarjaan kytkettyä kennoryhmää, ja kahdessa 23 sarjaan kytkettyä kennoryhmää. Moduulit on kytketty keskenään sarjaan, jolloin koko akuston kytkentäkonfiguraatio on 96 sarjaan ja 46 rinnan. Sarjaan kytkentöjä on siis lopulta saman verran kuin Model S akustossa. Kytkentäkonfiguraatiosta päätellen kaikki moduulien rinnankytketyt ryhmät eivät ole saman kokoisia keskenään. Yksi moduuli painaa noin 106 kilogrammaa, eli yhteensä moduuleilla on painoa noin 424 kilogrammaa. [22]

3.4.3 BMW i3

BMW i3 sähköauton 33 kWh kapasiteetin akkupaketissa on 96 kappaletta Samsung SDI:n valmistamia prismaattisia litiumioni akkukenoja. Yhden kennon kapasiteetti on 350 Wh. Akkupaketti on jaettu kahdeksaan moduuliin, joista kussakin on 12 kennoa.

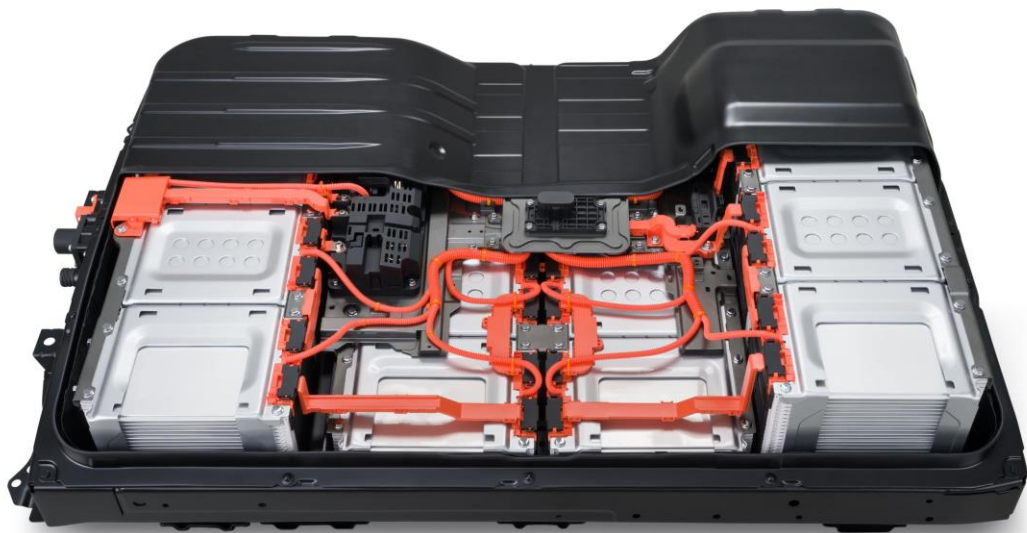


Kuva 5. Kurkistus BMW i3 akkupaketin sisälle [23]

Tässä akussa on käytetty ainoastaan sarjaan kytkentää. Jokainen kenno on kytketty sarjaan ja jokainen moduuli on kytketty sarjaan. [23] Akkupaketti on sijoitettu auton pohjaan.

3.4.4 Nissan Leaf

Nissan Leafin uudemman akkumallin kapasiteetti on 40 kWh. Akustossa on 192 kappaletta AESC:n valmistamia NMC-litiumionipussikennoja. Yksi moduuli koostuu kahdeksasta kennosta, ja yhteensä moduuleita on 24.



Kuva 6. Nissan Leafin akkupaketti [24]

Moduulissa aina kaksi kennoa on kytketty rinnan ja neljä sarjaan. Moduulit on kytketty sarjaan. Yhdellä moduulilla on painoa 8,7 kilogrammaa, joten koko akkupaketilla on painoa pitkälti yli 200 kilogrammaa. Tässäkin tapauksessa akku on sijoitettu auton pohjalle. [24]

4 Sähköauton tulipaloriski

4.1 Tulipalon syyt

Sähköauton merkittävin tulipaloriski piilee sen energiavarastossa eli akustossa, sekä auton sähköjärjestelmissä. Sähköautossa ei ole varsinaisia lämmönlähteitä kuten polttomoottoriauton moottori ja pakoputkisto. Sähköauton syttyminen tuleen ilman ulkoista palonaiheuttajaa johtuu lähes poikkeuksetta akkukennon vioittumisesta ja sitä seuraavasta reaktiosta, tai jonkinlaisesta oikosulusta muualla sähköjärjestelmässä. Myös huonosta liitoksesta johtuva kumentuminen voi aiheuttaa tulipalon, erityisesti pikalatauksessa käytetyn suuren virran kanssa.

Akun vioittuminen saa alkunsa lähes aina ulkoisesta syystä, kuten

- tärinästä tai kolhiintumisesta
- lämpötilavaihteluista
- ylikuormituksesta
- syväpurkautumisesta
- yllilataamisesta tai lataamisesta kylmänä. [25]

Normaalitilanteessa BMS pitää huolen siitä, että akustoa ladataan ja käytetään tarkoituksenmukaisesti, jolloin akku on turvallinen. Teoriassa jokin tekninen vika voisi altistaa akun vääriin olosuhteisiin, mutta todennäköisyys sille on pieni ja yleensä virrankulku katkaistaan vikatiloissa, jotta vahinkoa ei pääsisi tapahtumaan. Myös oikosulutilanteissa vahingot saadaan yleensä estettyä katkaisemalla virrankulku sulakkeella, ellei kyseessä ole kennon sisäinen oikosulku, jolle ei voida tehdä mitään.

Todennäköisin syy auton tuleen syttymiseen on kolaroinnista tai muusta vastaavasta akustoon kohdistunut vahinko. Akun syttyminen alkaa yleensä yksittäisen kennon leimahtamisesta, mikä johtuu yleensä kennon sisäisestä oikosulusta. Kennon sisäinen oikosulku voi sytyttää elektrolyytin tai kenno voi lämmetä liikaa, mistä seuraa lämpöryntäys

ja lopulta leimahtaminen. Kun yksi vioittunut kenno leimahtaa, palo leviää usein ketjureaktion tavoin viereisiin kennoihin, kunnes lopulta koko akusto saattaa palaa.

Akun vioittuminen voi saada alkunsa myös sisäisistä syistä, kuten epäpuhtauksista valmistusprosessissa tai akun vanhenemisesta johtuvista sisäisistä muutoksista, mutta todennäköisyys näille on hyvin pieni. [25]

Tulipalo voi myös alkaa virtaliitoksen löysyyden tai oikosulun aiheuttaman kipinän tapahtuessa oikeassa paikassa. Kipinä voi sytyttää esimerkiksi verhoilukankaan.

Tulipalo voi myös aiheutua sähköautosta riippumattomista syistä esimerkiksi autoa ladataessa tavallisesta pistorasiasta kotiloissa. Tavallista pistorasiaa ei ole suunniteltu sähköauton lataamisesta aiheutuvaan korkeaan ja pitkäkestoiseen kuormitukseen, vaan pahimmassa tapauksessa pistorasia syöttökaapeleineen voi ylikuumentua ja aiheuttaa tulipalon. Ladatessa tavallisesta pistorasiasta sen kunto tulisi tarkastaa ennen käyttöä ja käyttää enintään kahdeksan ampeerin latausvirtaa riskien minimoimiseksi. [26]

4.2 Riskit kolarin jälkeen

Kolarin sattuessa akku ei välttämättä syty tapahtumahetkellä, mutta se voi syttyä myöhemmin, sillä vahinko on voinut jo tapahtua ja kennosta on voinut tulla epävakaa [11]. Jo syttyneen sähköautopalon sammuttaminen voi olla haasteellista. Tehokkain tapa sammutukseen on yrittää jäähdyttää akustoa vedellä [25]. Vaikka palo olisi saatu jo sammutettua, akut saattavat syttyä uudestaan tuleen jopa päiviä myöhemmin. Tämä akkujen arvaamaton käytös lisää haasteita kolaroitujen sähköautojen kanssa menettelyyn, jotta onnettomuuden jälkeenkin tulipaloriskit saadaan minimoitua. Auto olisi tärkeää saada vähintään sellaiseen paikkaan, jossa mahdollisessa uudelleensyttymisestilanteessa ei ole palon leviämisen mahdollisuutta, ja auton voi antaa palaa loppuun itsestään. Paras vaihtoehto on upottaa auto kokonaan veteen, esimerkiksi vedellä täytettyyn vaihtolavaan.

5 Sähköauton tulipalotapahtumia

Työhön on valikoitu muutamia esimerkkejä tulipaloista. Niiden valinnassa on otettu huomioon niiden syyt ja seuraukset, ja onko tulipaloon tai sen jälkimaininkeihin liittynyt jotain muuta merkille pantavaa. Pyrkimyksenä on tuoda esille mahdollisimman laaja katsaus tulipaloihin liittyen.

5.1 Teslan pohjaan kohdistuneet iskut

Ensimmäinen lokakuuta 2013 Yhdysvalloissa Tesla Model S ajoi maantienopeudella edellä ajavasta kuorma-autosta tippuneen metalliesineen yli, joka iskeytyi auton pohjaan. Akku vahingoittui ja aiheutti auton syttymisen tuleen. Auton varoitusjärjestelmä neuvoi kuljettajaa pysäyttämään ajoneuvon ja sitten poistumaan ajoneuvosta. Kuljettaja selvisi vahingoitta toimittuaan ohjeen mukaisesti.

Metalliesine oli puhkaissut reiän autoa ja sen akkupakettia suojaavaan yli puolen senttimetrin paksuiseen pohjalevyyn ja vahingoittanut akkumoduulia auton etuosassa, mistä palo sai alkunsa. Palon laajeneminen pysyi kurissa auton etuosassa akkupaketin sisäisten paloseiniä ja tulta alaspäin ohjaavien aukkojen ansiosta. Palo ei edennyt auton matkustamotiloihin, ennen kuin palokunta sai auton sammutettua. [27]

Reilu kuukausi myöhemmin kuudes marraskuuta 2013 Yhdysvalloissa tapahtui toinen samankaltainen tapaus. Tesla Model S ajoi maantienopeudella vetokoukun yli, joka lävisti pohjalevyn ja vahingoitti akkua. Vahingon seurauksena auto syttyi tuleen. Tässäkään tapauksessa kuljettaja ei loukkaantunut. [28]

Näiden tapauksien jälkeen Tesla päivitti kaikkien Model S autojen ohjelmistot niin, että auton ajokorkeus nousee maantienopeuksissa, jolloin pohjaan kohdistuvat vahingot vähenisivät. NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) käynnisti tutkinnan Model S mallin paloturvallisuudesta. Maaliskuussa 2014 NHTSA sulki tutkinnan Teslan parantaessa akuston suojausta kolmeosaisella suojaratkaisulla, sisältäen titaanisen suojaalevyn. [29; 30] Kyseisten toimenpiteiden jälkeen vastaavanlaisia tapauksia ei ole raportoitu.

5.2 Latauksessa olleiden sähköautojen paloja

Marraskuussa 2013 Yhdysvalloissa syttyi tulipalo autotallissa, jossa Tesla Model S oli latauksessa. Tulipalo näytti saaneen alkunsa pistorasiasta, johon Teslan latauskaapeli oli kytketty, sillä auton puolella kaapelissa ei ollut merkkejä vahingosta. [31] Seurauksena tästä tapauksesta, Tesla julkaisi ohjelmistopäivityksen, joka alentaa lataustehoa 25 prosentilla mikäli latauksen aikana havaitaan lataustehon odottamatonta vaihtelua. Tehon vaihtelu voi olla merkki sähköjärjestelmän toimimisesta ääriarajoilla, ja täten riskialueella. [32] Hieman myöhemmin Tesla julkaisi myös uudistetun kiinteän latauslaitteen, jossa on lämpökatkaisin. [33]

Tammikuussa 2016 Supercharger asemalla latauksessa ollut Tesla Model S syttyi tuleen Norjassa. Teslan lausunnon mukaan palon aiheutti oikosulku auton sähköjen jakorasiassa. Tarkkaa oikosulun syytä ei saatu selville auton suurten palovahinkojen takia. Auton omistaja ehti tyhjentää tavaransa autosta havaittuaan auton syttymisen.



Kuva 7. Tunnistamattomaksi kasaksi palanut sähköauto [34]

Palokunta oli epätietoinen sähköauton sammutusmenetelmistä, sillä tapaus oli heille ensimmäinen laatuaan. Palokunta päätti antaa auton palaa loppuun ja suojaasi ympäristön palon leviämislta. [34]

Kesäkuussa 2019 Belgiassa Tesla Model S syttyi palamaan ollessaan latauksessa Supercharger- asemalla. Syttymisen syy ei ole tiedossa, mutta jonkinlainen tekninen vika on palon todennäköinen aiheuttaja. Saatuaan palon kuriin, palokunta upotti auton vedellä täytettyyn vaihtolavaan. [35]

5.3 Itsestään syttyminen

Huhtikuussa 2019 Tesla Model S syttyi näennäisesti itsestään palamaan parkkihallissa Shanghaissa, Kiinassa. Tapahtuma tallentui valvontakameralle. Auton alta alkoi tupruamaan savua, ja hetkeä myöhemmin auto leimahti tuleen räjähdysmäisesti. Myös vieressä olleet autot vahingoittuivat. Teslan tutkimusten mukaan palon aiheutti yksi viallinen akkumoduuli. [36]

Näennäisiä itsestään syttymisiä on tapahtunut useamminkin, mutta syttymisen lopullinen syy on jäänyt pimentoon, joten niiden listaaminen ei ole tarpeellista.

5.4 Syttyminen kolarin seurauksena

Toukokuussa 2018 Tesla Model S kulki huomattavaa ylinopeutta, kunnes kuljettaja menetti auton hallinnan. Seurauksena auto suistui reunakivetykseen ja törmäsi seinään, suistuen siitä 5-kaistaisen tien poikki osuen toisen puolen reunakivetykseen ja siitä valotolppaan. Autosta kerätyn datan perusteella ajonopeus oli turvavyöjen laukaisuhetkellä 86 mailia tunnissa (n. 138 km/h) nopeusrajoituksen ollessa 30 mailia tunnissa. Auto kärsi törmäyksessä huomattavat vahingot ja syttyi tuleen. Kuljettaja ja matkustaja menehtyivät auton sisälle. [37]

Kolarin seurauksena syttyneissä sähköautopaloissa palon syy on selvä. Akku kärsii ulkoisen vahingon, joka johtaa sen syttymiseen. Näissä tapaturmissa tekijöinä ovat toistu-

vasti ylinopeus ja auton hallinnan menetys, joita seuraa törmäys suurella nopeudella tuhoisin seurauksin. Auton syttymisessä on yleensä tarpeeksi viivettä, jotta tajuissaan oleva ihminen ehtii poistumaa ajoneuvosta törmäyksen jälkeen. Löytämistäni Teslojen tulipaloista ylivoimaisesti suurin osa syttyi jonkinlaisen törmäyksen seurauksena. Tähän saattaa vaikuttaa kenties Teslojen korkea suorituskyky, ja sitä kautta houkutus suurella nopeudella ajamiseen.

5.5 Pohdintaa

Tapauksia etsiessä ja tutkiessa alkoi vaikuttamaan siltä, että lähes kaikki vastaan tulevat raportoidut paloturmat koskivat Teslan Model S ja X -automalleja. Tästä heräsi mielenkiinto tutkia aihetta hieman tarkemmin ja pohtia selittykö ilmiö Teslan autojen suosiolla ja yrityksen suurella mediahuomiolla. Mallikohtaisesti muiden sähköautojen tulipalojen hakeminen ei juuri tuottanut tulosta joitain yksittäistapauksia lukuun ottamatta.

Otetaan esimerkiksi Nissan Leaf, joka on maailmanlaajuisesti eniten myyty sähköauto. [38] Leaf vaikutti olevan osallisena ainoastaan kahdessa tulipalossa, joissa molemmissa palon aiheuttaja oli epäselvä. Toisessa tapauksessa omakotitalon tulipalo sai alkunsa autotallista, jossa oli palohetkellä kaksi autoa, joista toinen oli Nissan Leaf. Palon alkuperä ei ollut tarkemmin tiedossa. Toisessa tapauksessa Nissan Leaf oli syttynyt tuleen liikenteessä, mutta Nissanin mukaan palo ei olisi johtunut ajoneuvosta. [39] Tapauksista ei siis selviä onko sähköauto ollut syyllinen palojen alkuperään.

Toisena esimerkkinä otetaan Hyundai Kona Electric. Niitä on palanut tiettävästi viisi kappaletta, eli huomattavasti enemmän kuin Nissan Leaf mallin autoja. Näistä kaikki on tapahtunut vuoden 2019 aikana, auton tullessa markkinoille vuonna 2018. Näissä on se merkittävä huomio, että kaikki ovat tapahtuneet joko auton ollessa latauksessa, tai väitetyksi käyttämättömänä. [40; 41; 50]

Mielenkiintoista on myös se, että Teslan Model 3 -malli ei vaikuttaisi olevan sidottu kuin ainoastaan yhteen tulipaloon, jossa se törmäsi maantienopeudella rajusti kuorma-autoon Moskovassa. [42] Model 3 -mallia on tätä nykyä myyty enemmän kuin Model S ja X -malleja, ja uskoisin Teslan saavan saman mediahuomion, oli tulipalon kohteena mikä

Teslan malli hyvänsä. Model S ja X -malleissa on samanlaiset akustot, mutta Model 3 -mallissa käytetään erilaista akustoa, jossa käytetään myös erilaisia akkukennoja.

Näiden seikkojen perusteella ei voida tehdä lopullisia johtopäätöksiä, mutta tämän pintapuolisen tarkastelun pohjalta ajautuu helposti lopputulemaan, että Model S ja X -mallien akustojen todennäköisyys syttyä tuleen on huomattavasti korkeampi kuin monessa muussa sähköautomallissa.

6 Vertailua polttomoottoriautoon

6.1 Tulipaloriskin aiheuttajat

Tekniikan osalta sähköauton ja polttomoottoriauton suurimmat eroavaisuudet löytyvät energianvarastoinnista ja voimantuotosta. Siinä missä polttomoottoriautossa on polttoainetankki ja polttoaineen siirtämiseen polttoainelinjoja, sähköautossa on akku ja kaapeleita sähkönsiirtymiseen. Polttomoottoriautossa on polttoaineen lisäksi myös muita palavia nesteitä, kuten moottoriöljy ja vaihteistoöljy. Näitä seikkoja voidaan pitää myös tulipaloriskin kannalta sähkö- ja polttomoottoriautojen merkittävimpinä eroavaisuuksina.

Polttomoottoriautossa mahdollisia palonaiheuttajia voivat olla muun muassa polttoaineen tai muiden nesteiden vuodot, viat sähköjärjestelmässä tai moottorin ylikuumentuminen ja vikaantuminen. Polttomoottoriautoa ei useinkaan ladata öisin sähköautosta poiketen, ja käyttämättömänä ollessaan polttomoottoriautossa ei juuri ole aktiivisia laitteita, joten sitä voidaan tässä mielessä pitää turvallisempänä.

6.2 Tilastoja ja pohdintaa

USFA:n (US Fire Administration) raportin mukaan vuosien 2014-2016 aikana Yhdysvalloissa tapahtui keskimäärin 171 500 ajoneuvopaloa vuodessa. Ne vaativat keskimäärin 345 kuolonuhria ja 1300 loukkaantumista vuodessa. Näihin lukuihin on laskettu mukaan kaikki liikenneajoneuvotyypit.

Ajoneuvopaloista 66 % koski tavallisia matkustaja-ajoneuvoja. Yleisin palon syy oli tahattomat palot, joita oli 38 %. Näissä palon syy voi olla joko huolimattomuus tai vahinko. Toiseksi yleisimpiä olivat palot, joiden syy ei selvinnyt tutkinnan jälkeen (23 %) ja kolmanneksi yleisin syy oli toimintahäiriö laitteissa (21 %). Tähän sisältyy kaikenlaiset mekaaniset ongelmat suunnitteluvirheistä virheellisiin asennuksiin.

Suurimmassa osassa tapauksista (93 %) tulipalo sai alkunsa jostain kohtaa kyseessä olevaa ajoneuvoa, ja ulkopuolisista syistä syttyneitä autoja oli vain 7 %. Eniten oli tapauksia (62 %), joissa palo sai alkunsa moottorilasta, voimansiirrosta tai renkaiden läheisyydestä. Toiseksi yleisin (12 %) palon alkusijainti oli matkustamotilat.

Tulipaloista, joiden alkuperä oli tiedossa, suurin osa (45 %) johtui mekaanisista toimintahäiriöistä, joihin lukeutuu muun muassa vuodot ja komponenttien hajoamiset. Toiseksi yleisin aiheuttaja (21 %) oli sähköiset toimintahäiriöt, joihin lukeutuvat muun muassa oikosulut. [43]

Tilastojen pohjalta on mahdoton tehdä tarkkoja määritelmiä paloturvallisuuden tasosta ajoneuvojen valtavasta määrästä ja tilastoinnin puutteellisuudesta johtuen. Parhaimmillaan aiheesta voidaan tehdä karkeita arvioita. Vertailua sähköauton ja polttomoottoriauton välillä hankaloittaa myös sähköautojen marginaalinen määrä ja sähköajoneuvokannan matala ikä, ja sen mahdollinen tuloksen vääristäminen.

Voidaan kuitenkin tehdä esimerkkinä karkea arvio Yhdysvalloista löytyvien tietojen perusteella. Vuonna 2017 Yhdysvalloissa oli noin 272 miljoonaa ajoneuvoa [44]. Samana vuonna Yhdysvalloissa oli noin 757 000 ladattavaa sähköautoa [45, s. 19]. Ladattavia sähköautoja oli siis ajoneuvokannasta noin 0,3 %. NFPA:n (National Fire Protection Association) tutkimuksen mukaan vuonna 2017 Yhdysvalloissa tapahtui noin 168 000 liikennevälinepaloa [46, s. 5]. Jos tästä määrästä lasketaan niin sanottu ladattavien sähköautojen osuus, eli 0,3 %, saadaan tulokseksi 504 tapausta. Laskelma on epätarkka, koska ladattavia sähköautoja verrataan koko ajoneuvokantaan pelkän polttomoottorihenkilöauton sijaan, mutta se on hyvin suuntaa antava.

Selvitykseni perusteella kuitenkin Yhdysvalloissa vuosittain sattuneiden sähköautopalojen määrä on huomattavasti pienempi. Viitteitä suuresta määrästä sähköautopaloja ei

löydy mediasta, ja yksittäistapauksien käsittelytapa edelleen vahvistaa mielikuvaa, sillä viittauksia esimerkiksi sähköautopalojen kokonaismääriin ei ole.

Suomessa tapahtuu Pronto-rekisterin (Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto) mukaan vuosittain keskimäärin hieman yli 2000 liikennevälinepaloa. Tarkemmin vuonna 2018 tapahtui 2331 liikennevälinepaloa. Tilasto sisältää hätäkeskuksille ilmoitetut onnettomuudet ja tapahtumat, joihin pelastustoimi on osallistunut. [47] Samoin kuin esimerkiksi Yhdysvaltojen tilanteesta, tilasto on siinä mielessä aiheen kannalta huono, että se sisältää myös muut liikennevälineet kuin autot. Vuonna 2018 henkilöautoista noin 0,09 % oli sähköautoja. Sillä oletuksella, että kaikki liikennevälinepalot koskisivat henkilöautoja, vuonna 2018 olisi pitänyt palaa melko tarkalleen kaksi sähköautoa. Henkilöautot eivät kuitenkaan muodosta kaikkia liikennevälinepaloja, joten sähköautojen palot vuodessa pitäisi jäädä keskimäärin alle kahteen tapaukseen, puhuttaessa ainoastaan täys-sähköautoista. Traficomien tilasto ei erittele ladattavia hybridiautoja muista hybrideistä, joten niitä ei voi ottaa mukaan laskelmiin.

En ole kuitenkaan varma paloiko Suomessa vuonna 2018 yhtäkään sähköautoa, sen sijaan ainakin yksi ladattava hybridi kuitenkin syttyi tuleen latauksessa ollessaan [48]. Vuonna 2019 on joulukuuhun mennessä tietävästi palanut yksi sähköauto, joka oli latauksessa oleva Hyundai Kona Electric. Kyseisessä tapauksessa auto syttyi vielä kahdesti uudestaan palokunnan jo poistuttua paikalta. [49; 50; 51] Otannan ollessa näin pieni, satunnaistapahtumat voivat vaikuttaa tulokseen dramaattisesti, joten aihetta täytyisi tutkia pitkällä aikavälillä tarkemman keskiarvon saamiseksi.

7 Pohdintaa

Sähköautojen paloturvallisuuden eteen on tehty jo paljon töitä, mutta täytyy muistaa, että sähköautoiluun liittyvien erikoisuuksien kehitys on vielä aivan lapsenkengissä verrattuna vuosisadan verran kovan kehitystyön alla olleeseen polttomootoriautoiluun. Kehitystyötä niin akkuteknologian kuin sähköjärjestelmien suhteen tehdään jatkuvasti. Kaikkia paloturvallisuuskriittisiä ongelmia ei kuitenkaan välttämättä pystytä havaitsemaan auton suunnitteluvaiheessa, jolloin niihin voidaan reagoida vasta ongelmien sattuessa eteen käytännössä. Tämä valitettava tosiasia saattaa aiheuttaa henkilövahinkojakin, mutta se on pakollinen paha, joka kulkee aina osana kehitystyötä.

Sähköauton paloturvallisuuden kynnyskysymykset pyörivät pitkälti litiumioniakkujen ympärillä niiden ollessa tuleen syttymisen kannalta herkempiä verrattuna muihin akkutyypeihin. Nykyisessä akkuteknologian tilassa litiumioniakku on kuitenkin kaikista varteen otettavin energianvarastointimuoto sähköautoiluun, joten töitä tehdään sen turvallisuuden edistämiseksi. Jo nykytilassa akuston hallinta on erittäin hyvällä tasolla ja akun sytyessä ilman ulkoista vahingonaiheuttajaa puhutaan käytännössä satunnaistapahtumasta, joka ei suoraan viittaa suunnitteluongelmiin. Mikäli litiumioniakkujen käyttö hylätäisiin ajoneuvokäytössä, sähköautojen kehitys saattaisi jäädä siihen.

Puhuttaessa litiumioniakkujen syttymisominaisuuksista, on hyvä muistaa, että polttomootoriautot kulkevat erittäin syttymisherken nesteeseen voimalla ja sen mukana kulkee huomattavasti suurempi määrä energiaa akkuihin verrattuna. Polttoaineesta ja sen syttymisominaisuuksista vaikuttaa kuitenkin muodostuneen jo kaikkien tiedostama ja hyväksymä normaalitilanne, siinä missä akun syttyminen nähdään täysin eri valossa. Tähän ajattelutapaan todennäköisesti johtaa se, että polttoainetta nimensä mukaan käytetään palotapahtuman aikaansaamiseksi, siinä missä akkua käytetään sähköenergian varastointiin. Pohjimmiltaan kuitenkin näiden komponenttien tarkoitusperä ajoneuvokäytössä on täysin sama: käyttöenergian varastointi.

Tämä sama ajattelumalli näkyy myös mediassa, ja medially on loppupeleissä suuri vaikutus ihmisten mielipiteisiin. Sähköauton palaminen on aina uutisartikkelin arvoinen, mutta polttomootoriauton palaminen on uutisartikkelin arvoinen ainoastaan, jos se aiheuttaa liikenteen ruuhkautumisen. Tällöinkin on epätodennäköistä, että auton merkki tai malli ilmoitetaan, mutta sähköauton tapauksessa se löytyy yleensä jo otsikosta.

Ajatellen sähköautojen nykyistä tilaa, en tämän opinnäytetyön selvitysten pohjalta näe ongelmaa paloturvallisuuden suhteen verrattuna muihin autoihin. Sähköautojen määrä maailmalla liikkuu miljoonissa, mutta viitteitä palotapauksista ei määrään nähden ole kuin kourallinen. Sähköautojen tulipaloriskiä nostavat myös itse autoista riippumattomat seikat. Sähköautot laitetaan usein latautumaan yöksi ilman minkäänlaista valvontaa. Sen lisäksi kotilojen sähköasennukset eivät välttämättä ole riittävän hyväkuntoisia ja määräystenmukaisia turvalliseen sähköauton lataukseen, sekä pahimmillaan käytössä saattaa olla myös asukkaan omia viritelmiä, esimerkiksi ajastimia. Mielestäni tämä on sellainen aihe, johon ei välttämättä kiinnitetä riittävästi huomiota. Mikäli sähköautoa aiotaan ladata paljon kotona, on syytä varmistua, että sähköasennukset ovat täysin asianmukaisella tasolla, sillä riskinä on pahimmassa tapauksessa koko talon ja omaisuuden palaminen, henkilövahingoista puhumattakaan.

Aiheen tutkimista vaikeuttaa tilastoinnin puute ja sen epätarkkuus ajoneuvoluokkien suhteen. Tämän opinnäytetyön päätelmät ovat siis lähinnä arvioita ja spekulatiota. Tulevaisuuden näkymät ovat mielestäni erittäin lupaavat sähköautojen suhteen ja uskoisin niiden olevan tulevaisuudessa selkeästi paloturvallisempia verrattuna polttomoottoriautoihin. Näkemys perustuu sähköauton jatkuvaan kehitykseen ja siihen, että sähköautoilussa ei lähtökohtaisesti käsitellä palavia nesteitä ja lämmöntuotto on huomattavan pientä verrattuna polttomoottoriautoon.

Lähteet

- 1 Larminie, James; Lowry, John. 2012. Electric Vehicle Technology Explained. Chichester: John Wiley & Sons.
- 2 Bellis, Mary. 2019. The History of Electric Vehicles Began in 1830. Verkkoaineisto. ThoughtCo. <<https://www.thoughtco.com/history-of-electric-vehicles-1991603>>. Päivitetty 23.3.2019. Luettu 25.11.2019.
- 3 Musk, Elon; Straubel, JB. 2012. Model S Efficiency and Range. Verkkoaineisto. Tesla. <https://www.tesla.com/fi_FI/blog/model-s-efficiency-and-range?redirect=no>. 9.5.2012. Luettu 11.11.2019.
- 4 Bensiiniopas, 2016. Neste. Verkkoaineisto. <https://www.neste.fi/sites/neste.fi/files/Bensiiniopas_2016.pdf>
- 5 Traficom. Liikennekäytössä olevat ajoneuvot käyttövoimittain 2007-2018. Verkkoaineisto. <<https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot>>. Luettu 27.11.2019.
- 6 Haugneland, Petter. 2019. Over 200 000 elbiler i Norge. Verkkoaineisto. Elbil.no. <<https://elbil.no/over-200-000-elbiler-i-norge/>>. 14.1.2019. Luettu 12.11.2019.
- 7 IEA. Global EV Outlook 2019. Verkkoaineisto. <<https://www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019/>>. Luettu 27.11.2019.
- 8 Battery University. Is Lithium-ion the Ideal Battery? Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery>. Arkistoitu. Luettu 15.11.2019.
- 9 Battery University. Understanding Lithium-ion. Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion>. Luettu 15.11.2019.
- 10 OVA-ohje: Moottoribensiini. Verkkoaineisto. Työterveyslaitos. <<https://www.ttl.fi/ova/moottben.html>> Päivitetty 20.1.2016. Luettu 19.11.2019.
- 11 Battery University. BU-304a: Safety Concerns with Li-ion. Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion>. Päivitetty 23.4.2019. Luettu 20.11.2019.
- 12 Battery University. BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries. Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries>. Päivitetty 10.7.2019. Luettu 19.11.2019.

- 13 Warner, John T. 2019. Lithium-Ion Battery Chemistries, A primer. Amsterdam: Elsevier.
- 14 Battery University. BU-301a: Types of Battery Cells. Verkkoaineisto. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Päivitetty 10.7.2019. Luettu 18.11.2019.
- 15 Williams, Jason. 2018. The Future of Green Energy. Verkkoaineisto. WealthDaily. <<https://www.wealthdaily.com/articles/the-future-of-green-energy/90731>>. 26.1.2018. Luettu 27.11.2019.
- 16 Korthauer, Reiner. 2019. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. Berliini: Springer
- 17 domdomegg. 2016. "A Nissan Leaf cutaway at FutureFest 2016". CC-BY 4.0. Verkkoaineisto. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nissan_Leaf_cutaway_at_FutureFest_2016_01.jpg>.
- 18 Roper, L. David. 2019. Tesla Model S. Verkkoaineisto. <<http://www.roperld.com/science/TeslaModelS.htm>>. 28.1.2019. Luettu 12.11.2019.
- 19 EVTV Monitor/Controller For Tesla Model S Battery Modules. 2017. Verkkoaineisto. <<http://media3.ev-tv.me/TeslaModuleController.pdf>>. Luettu 25.11.2019.
- 20 Kane, Mark. 2013. Tesla Model S chassis with battery pack. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/photo/3927355/continental-just-now-hints-at-being-supplier-of-tesla-model-s-air-suspension/>>. 9.9.2013. Luettu 26.11.2019.
- 21 Tesla. 2013. Battery swap event. Video. <<https://www.youtube.com/watch?v=S0sHtlCZ7M>>.
- 22 Arcus, Christopher. 2018. Tesla Model 3 & Chevy Bolt Battery Packs Examined. Verkkoaineisto. Cleantechnica. <<https://cleantechnica.com/2018/07/08/tesla-model-3-chevy-bolt-battery-packs-examined/>>. 8.7.2018. Luettu 22.11.2019.
- 23 Lima, Pedro. 2018. Samsung SDI 94 Ah battery cell full specifications. Verkkoaineisto. PushEVs. <<https://pushevs.com/2018/04/05/samsung-sdi-94-ah-battery-cell-full-specifications/>>. 5.4.2018. Luettu 12.11.2019.
- 24 Kane, Mark. 2018. Nissan Leaf 40-kWh Battery: Deep Dive. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/news/338432/nissan-leaf-40-kwh-battery-deep-dive/>>. 1.8.2018. Luettu 13.11.2019.

- 25 Niemi, Seppo; Meurman, Karoliina. 2018. Litiumioniakkujen paloturvallisuus. Tukes. Verkkoaineisto. <<https://tukes.fi/documents/5470659/10576880/Niemi+Meurman+Litiumioniakkujen+paloturvallisuus/cce05acc-6b48-e69e-70b6-14c27781b93e/Niemi+Meurman+Litiumioniakkujen+paloturvallisuus.pdf>>. 16.10.2018. Luettu 25.11.2019.
- 26 Tukes. 2019. Lataa sähköautosi turvallisesti. Verkkoaineisto. <https://tukes.fi/artikkeli/-/asset_publisher/lataa-sahkoautosi-turvallisesti>. Päivitetty 27.5.2019. Luettu 12.11.2019.
- 27 Musk, Elon. 2013. Model S Fire. Verkkoaineisto. Tesla. <https://www.tesla.com/fi_FI/blog/model-s-fire?redirect=no>. 4.10.2013. Luettu 12.11.2019.
- 28 Trop, Jaclyn. 2013. Another Fire Raises Questions for Tesla. Verkkoaineisto. New York Times. <<https://www.nytimes.com/2013/11/08/business/another-fire-raises-questions-for-tesla.html>>. Päivitetty 9.11.2013. Luettu 26.11.2019.
- 29 Musk, Elon. 2014. Tesla Adds Titanium Underbody Shield and Aluminum Deflector Plates to Model S. Verkkoaineisto. Tesla. <https://www.tesla.com/fi_FI/blog/tesla-adds-titanium-underbody-shield-and-aluminum-deflector-plates-model-s?redirect=no>. 28.3.2014. Luettu 20.11.2019.
- 30 NHTSA. 2013. Fire – Propulsion Battery – Road Debris. ID: PE13037. Verkkoaineisto. <<https://www.nhtsa.gov/recalls?nhtsalid=PE13037>>. Luettu 25.11.2019.
- 31 Loveday, Eric. 2013. UPDATE: Tesla Spokesperson: Model S "Absolutely Was Not" the Cause of a Garage Fire in California. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/news/320286/update-tesla-spokesperson-model-s-absolutely-was-not-the-cause-of-a-garage-fire-in-california/>>. 19.12.2013. Luettu 26.11.2019.
- 32 Loveday, Eric. 2013. Tesla Model S Software Update 5.8.4 Reduces Charging Current by 25% If Input Power Fluctuations Are Detected. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/news/320368/tesla-model-s-software-update-584-reduces-charging-current-by-25-if-input-power-fluctuations-are-de/>>. 23.12.2013. Luettu 26.11.2019.
- 33 Loveday, Eric. 2014. In Response to Garage Fire, Tesla Model S Owners Will Receive Upgraded Charging Adapter. Verkkoaineisto. InsideEVs. <<https://insideevs.com/news/320769/in-response-to-garage-fire-tesla-model-s-owners-will-receive-upgraded-charging-adapter/>>. 10.1.2019. Luettu 26.11.2019.
- 34 Hanley, Steve. 2016. Tesla Identifies Cause for Model S Fire in Norway. Verkkoaineisto. Teslarati. <<https://www.teslarati.com/tesla-short-circuit-cause-for-model-s-norway-fire/>>. 17.3.2016. Luettu 21.11.2019.

- 35 Aelberts, Jan. 2019. Brandende Tesla moet nachtje in bad om vlammen te doven. Verkkoinen. HLN. <<https://www.hln.be/in-de-buurt/antwerpen/brandende-tesla-moet-nachtje-in-bad-om-vlammen-te-doven~a112edf9/>>. 2.6.2019. Luettu 21.11.2019.
- 36 Rapier, Graham. 2019. Tesla's investigation confirms a Model S that caught fire on video in Shanghai had a faulty battery module. Verkkoinen. Business Insider. <<https://www.businessinsider.com/tesla-battery-fire-shanghai-update-investigation-findings-2019-7?r=US&IR=T>>. 1.7.2019. Luettu 21.11.2019.
- 37 Gastelu, Gary. 2018. NTSB: Tesla was going 116 mph at time of fatal Florida accident, battery pack reignited twice afterwards. Verkkoinen. Fox News. <<https://www.foxnews.com/auto/ntsb-tesla-was-going-116-mph-at-time-of-fatal-florida-accident-battery-pack-reignited-twice-afterwards>>. 26.6.2018. Luettu 21.11.2019.
- 38 Wandell, Jeff. 2019. Nissan LEAF first electric car to pass 400,000 sales. Verkkoinen. Nissannews. <<https://usa.nissannews.com/en-US/releases/release-a70f8c4b4ee0499b978e217ab10f37be-nissan-leaf-first-electric-car-to-pass-400-000-sales>>. 5.3.2019. Luettu 22.11.2019.
- 39 Grimaldi, Jeremy. 2019. Investigators looking at electric car in Markham house fire. Verkkoinen. Yorkregion. <<https://www.yorkregion.com/news-story/9527732-video-investigators-looking-at-electric-car-in-markham-house-fire/>>. 2.8.2019. Luettu 21.11.2019.
- 40 Dae-sun, Hong. 2019. All fires in electric vehicles in S. Korea this year involved Hyundai's Kona Electric. Verkkoinen. Hankyoreh. <http://www.hani.co.kr/arti/english_edition/e_business/912588.html>. Päivitetty 9.10.2019. Luettu 3.12.2019.
- 41 Salonen, Juha. 2019. Aiemmin uutisoitu Tesloista, nyt myös Hyundain sähköauto leimahti liekkeihin: Talo paloi päreiksi. Verkkoinen. Iltalehti. <<https://www.iltalehti.fi/autouutiset/a/e19521d6-8cab-4be3-82c6-c3e426fc0067>>. Päivitetty 5.8.2019. Luettu 3.12.2019.
- 42 Alvarez, Simon. 2019. Tesla Model 3 fire in Moscow: What we know so far. Verkkoinen. Teslarati. <<https://www.teslarati.com/tesla-model-3-fire-explosion-moscow-what-we-know-so-far/>>. 12.8.2019. Luettu 26.11.2019.
- 43 USFA. 2018. Highway Vehicle Fires (2014-2016). Verkkoinen. <<https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/statistics/v19i2.pdf>>. 7/2018.
- 44 FHWA. 2019. State Motor-Vehicle Registrations – 2017. Verkkoinen. <<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2017/mv1.cfm>>. 1/2019. Luettu 25.11.2019.

- 45 Gohlke, David; Zhou Yan. 2018. Impacts of Electrification of Light-Duty Vehicles in the United States, 2010-2017. Verkkoaineisto. Argonne National Laboratory. <<https://publications.anl.gov/anlpubs/2018/01/141595.pdf>>. 1/2018.
- 46 Evarts, Ben. 2018. Overview of 2017 United States Fire Experience. Verkkoaineisto. NFPA. <<https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/US-Fire-Problem/Old-FL-LL-and-Cat/Fire-Loss2018.ashx?la=e>>. 10/2018.
- 47 PRONTO. Pelastustoimen resurssi- ja onnettomuustilasto. Verkkoaineisto. <<https://prontonet.fi/>>. Luettu 25.11.2019.
- 48 Rautanen, Sari. 2018. Latauksessa ollut hybridauto paloi Ylöjärvellä lauantaiyönä – vaurioitui ajokelvottomaksi. Verkkoaineisto. Aamulehti. <<https://www.aamulehti.fi/uutiset/latauksessa-ollut-hybridauto-paloi-ylojarvella-lauantaiyona-vaurioitui-ajokelvottomaksi-201073978>>. Päivitetty 14.7.2018. Luettu 26.11.2019.
- 49 Uotila, Millamari. 2019. Latauksessa ollut sähköauto syttyi palamaan Lahdessa. Verkkoaineisto. Ess. <<https://www.ess.fi/uutiset/paijathame/art2530404>>. 30.3.2019. Luettu 3.12.2019.
- 50 Vesa Linja-aho: tiedonanto sähköpostitse. 3.12.2019
- 51 Puranen, Kaisu. 2019. Sähköauto syttyi kolmesti – akkupalo on arvaamaton ja vaikea sammuttaa. Verkkoaineisto. Pelastustieto. <<https://pelastustieto.fi/pelastustoiminta/operatiivinen-toiminta/sahkoauto-syttyi-kolmesti-akkupalo-on-arvaamaton-ja-vaikea-sammuttaa/#3204cda6>>. 28.6.2019. Luettu 8.12.2019.