

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

2019

Otto Aro

# SÄHKÖAUTON JA SEN VOIMALINJAN KEHITYSTILANNEKATSAUS

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

2019 | 35 sivua

Otto Aro

# SÄHKÖAUTON JA SEN VOIMALINJAN KEHITYSTILANNEKATSAUS

Ilmasto-ongelmia ratkaistaessa polttomoottoriautojen rinnalle ovat yleistymässä sähköautot. Sähköautot auttavat vähentämään ajoneuvoista aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä, jos energiantuotanto on tehty päästöttömällä tavalla. Sähköautot parantavat myös kaupunkien ilmanlaatua, koska niistä ei tule paikallispäästöjä.

Työn tavoitteena on selvittää, mikä on sähköautojen tilanne tällä hetkellä, ja mihin ollaan menossa. Työssä tarkastellaan sähköauton ja sen voimalinjan tärkeimpiä komponentteja, erityisesti akuissa ja niiden jäähdytyksessä käytettyjä ratkaisuja, sekä eri sähkömoottorityyppejä. Komponenttien hyötyjä ja haittoja esitellään. Työssä vertaillaan sähköautojen ja polttomoottoriautojen eroja. Myös tämän hetken yleisimpiä sähköautoja vertaillaan keskenään.

Nykyhetken tekniikan lisäksi tarkastellaan tulevaisuudessa mahdollisia ratkaisuja. Akkuratkaisuissa tulevaisuudessa litium-rikkiakut haastavat nykyisiä litium-ioniakkua, sekä kahden akkutyyppin yhdistelmien oletetaan yleistyvän, jotta eri akkutyyppien hyödyt saadaan maksimoitua. Moottoriratkaisuissa kestopagneettimoottorit ovat valtaamassa alaa.

ASIASANAT:

sähköauto, sähkömoottori, akku, voimalinja

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering

2019 | 35 pages

Otto Aro

## REVIEW OF A BATTERY ELECTRIC VEHICLE AND ITS DRIVETRAIN

Battery electric vehicles are a good solution in the battle against climate change if energy production is done in a sustainable way. Electric vehicles are becoming more common alongside internal combustion engine vehicles. Battery electric vehicles have no local emissions, which can solve the problems with air quality in big cities.

The objective of this thesis was to review the main components of the battery electric vehicle and its drivetrain. The main focus was on the battery and their cooling solutions, and the electric motor. The benefits and disadvantages of each component were studied. In the thesis the battery electric vehicle and the internal combustion engine vehicle were compared. Also, the most common battery electric vehicles were compared between each other.

The thesis reviews the technology used today, as well as the possible technologies used in the near future. With the battery solutions, lithium-sulphur batteries and dual-battery solutions are predicted to challenge the lithium-ion batteries used today.

### KEYWORDS:

electric vehicle, electric motor, battery, drivetrain

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>5</b>
<b>2 SÄHKÖAUTO VS. POLTTOMOOTTORIAUTO</b>	<b>6</b>
2.1 Kulutus	6
2.2 Päästöt	6
2.3 Elinkaarikustannukset	9
2.4 Kierrätettävyys	9
2.5 Sähkö- ja paloturvallisuus	10
<b>3 SÄHKÖAUTON VOIMALINJAN RAKENNE</b>	<b>11</b>
<b>4 SÄHKÖMOOTTORIT JA INVERTTERIT</b>	<b>13</b>
<b>5 AKKUJEN KEMIA JA LÄMMÖNHALLINTA</b>	<b>17</b>
5.1 Akkutyypit	17
5.2 Jäähdytystarve ja -hallinta	23
<b>6 TOTEUTUNEITA VOIMALINJARATKAISUJA</b>	<b>27</b>
<b>7 SÄHKÖAUTON TULEVAISUUS JA SIIHEN LIITTYVÄT HAASTEET</b>	<b>29</b>
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>31</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>32</b>

# 1 JOHDANTO

Tässä työssä luodaan katsaus nykyajan sähköautoihin ja niiden tärkeimpiin komponentteihin. Työssä vertaillaan sähkö- ja polttomoottoriautoja toisiinsa ja yleisimpiä sähköautoja keskenään, eri ratkaisuiden hyötyjen ja haittojen selvittämiseksi.

Sähkömoottorit olivat ensimmäinen ratkaisu auton liikuttamiseen, mutta ne jäivät polttomoottorilla toimivien autojen jalkoihin. Vääjäämättömän öljyn loppumisen ja uhkaavan ilmastokriisin lähestyessä kiinnostus sähköautoja kohtaan on jälleen lisääntynyt. Päästöjen vähentäminen on tärkeä tavoite globaalilla tasolla ja tulevaisuudessa sähköllä toimivat autot ovat hyvä keino päästä niihin tavoitteisiin. Päästövähennykset saavutetaan erityisesti maissa, joissa energiantuotanto on tehty uusiutuvilla ja päästöttömillä menetelmillä. Tämän päivän metropolialueilla haitallisista kaasuista, kuten hiilimonoksidista ja typen oksideista, on tulossa suuri ongelma. Sähköauto on apu kyseisten ilmanlaatuongelmien ratkaisemiseen paikallispäästöttömyytensä vuoksi.

## 2 SÄHKÖAUTO VS. POLTTOMOOTTORIAUTO

### 2.1 Kulutus

Sähköautojen hyötysuhde on polttomoottoriautoja korkeampi. Polttomoottoriautossa polttoaineen sisältämästä energiasta renkailla siirtyy noin 15 %, kun taas sähköautossa vastaava luku on noin 75 %. Molemmissa autotyypeissä kulutukseen vaikuttaa kuitenkin suuresti ajotapa. (Wilberforce ym. 2017.)

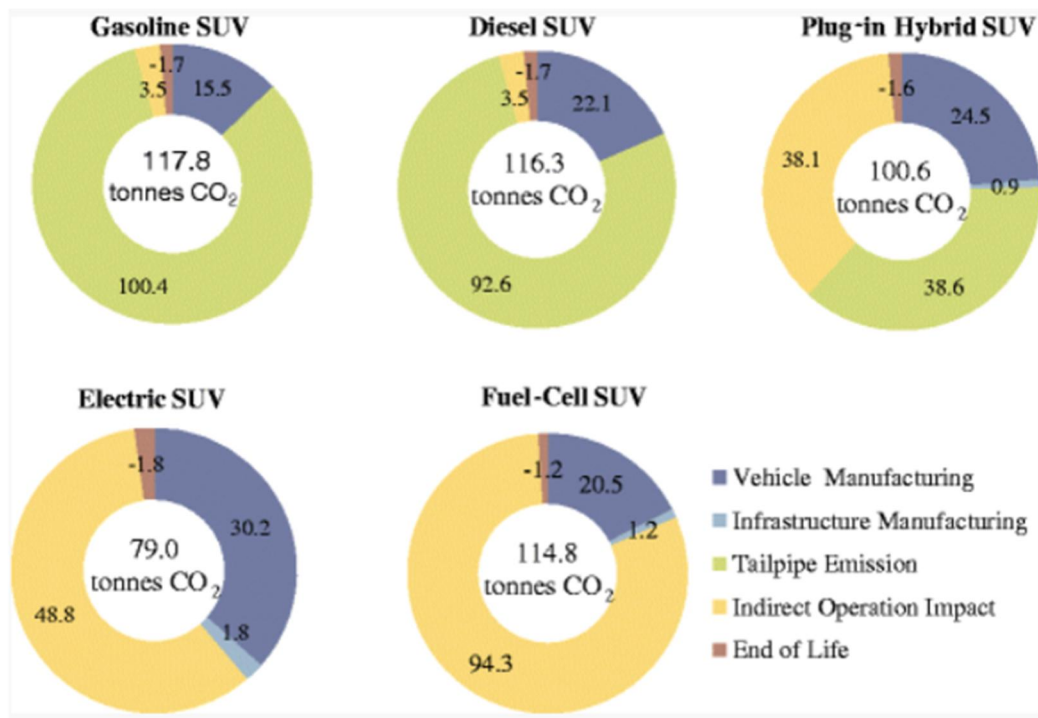
Sähköautojen kulutus vaihtelee eri autoissa. Kulutukseen vaikuttaa myös ympäristön lämpötila. Tesla Model S varustettuna 42 kWh:n akulla kulkee 258 km yhdellä latauksella, mikä tarkoittaa 163 Wh/km kesikikutusta. Nissan LEAF 24 kWh:n akulla liikkuu 160 km yhdellä latauksella, tarkoittaen 150 Wh/km kesikikutusta. Mitsubishi iMiEV 16 kWh:n akulla kulkee 206 km yhdellä latauksella, eli kesikikutukseksi tulee vain 78 Wh/km. (Chellaswamy & Ramesh 2017.)

Leen ja Choin (2017) tutkimuksessa vertailtiin KIA Ray- automalleja. Toiseen asennettiin 1 litran polttomoottori ja toiseen 50 kW:n sähkömoottori 50 Ah:n akulla. Polttomoottoriautolla taloudellisin nopeus oli 60 km/h, mistä koitui 28,9 km/l kesikikutus. Sähköautolla sama nopeus oli 15 km/h ja kulutus oli 16,9 km/kWh. Sähköautoilla alemmilla nopeuksilla ajaminen on taloudellisempaa kuin tavallisella polttomoottoriautolla, esimerkiksi kaupunkiajossa.

### 2.2 Päästöt

Sähköautoilla paikallispäästöt ovat lähes olemattomat. Ne auttavat vähentämään typen oksidipäästöjä ja muita haitallisia kaasuja kaupunkialueilla. Sähköautoista ei myöskään pääse juurikaan melusaasteita, koska sähkömoottorit ovat hiljaisia. (Racz ym. 2015.) Ne eivät kuitenkaan ole täysin päästöttömiä. Sähköautot aiheuttavat kasvihuonekaasuja niiden vaatiman energiatuotannon kautta, varsinkin maissa, joissa uusiutuvaa energiaa ei juurikaan ole käytettävissä. (Manzetti & Mariasu 2015.) Tuulivoimalla tuotetun sähkön käyttö aiheuttaa keskimäärin 7g CO<sub>2</sub>/MJ kohti ja ydinvoimalla tuotettu 9g CO<sub>2</sub>/MJ. Hiilellä tuotettu sähkö aiheuttaa 300-350g CO<sub>2</sub>/MJ. Esimerkiksi Kiinassa 250000 km ajaminen sähköautolla, joka kuluttaa sähköä 20 kWh/100km aiheuttaa 55000 kg hiilidioksidipäästöjä, kun taas Japanissa saman matkan ajaminen aiheuttaa vain 20000

kg hiilidioksidipäästöjä. Polttomoottoriautolla päästöjä aiheutuu 35700 kg, jos auto kuluttaa polttoainetta 6l/100km. (Treiber ym. 2017.) Toisessa tutkimuksessa tutkittiin katumaastureiden kasvihuonepäästöjä. Siinä sähköauton elinkaaren aikana tuotetut hiilidioksidipäästöt olivat 79000 kg, jos autolla ajetaan 320000 km. Polttomoottorilla toimivan katumaasturin hiilidioksidipäästöt olivat 117800 kg samoilla kilometreillä (kuva 1). (Karaaslan ym. 2018.)

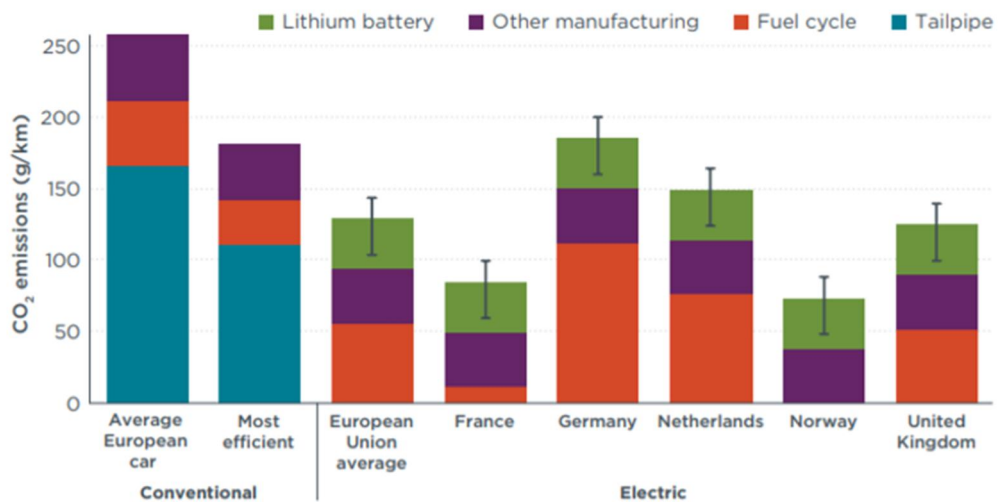


Kuva 1 - Katumaasturin elinkaaripäästöt 320000 ajetun kilometrin jälkeen (Karaaslan ym. 2018).

Suurimmat päästöt sähkö- ja polttomoottoriautoille syntyvät niiden varsinaisesta käyttämisestä. Sähköautoilla päästöt ovat kuitenkin huomattavasti pienempiä. Sähköautoilla käytön osuus on keskimäärin koko elinkaaren päästöistä 69 % ja polttomoottoriautoille 96 %. (Treiber ym. 2017.)

Euroopassa elinkaaren aikana aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat keskimäärin 50 % vähemmän sähköautoilla kuin polttomoottoriautoilla ensimmäisen 150000 ajetun kilometrin aikana, vaikka akkujen valmistus aiheuttaakin paljon hiilidioksidipäästöjä. Akkujen valmistuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt vaihtelevat valmistusmaiden välillä. Messagien (2017) tekemän tutkimuksen mukaan EU:n alueella valmistetun akun päästöt olivat 56 kg CO<sub>2</sub>/kWh, kun taas Romaren ja Dahllöfin (2017) tutkimuksen mukaan Aasiassa tehtyjen akkujen päästöt olivat 150 – 200 kg CO<sub>2</sub>/kWh. Paikallisesta

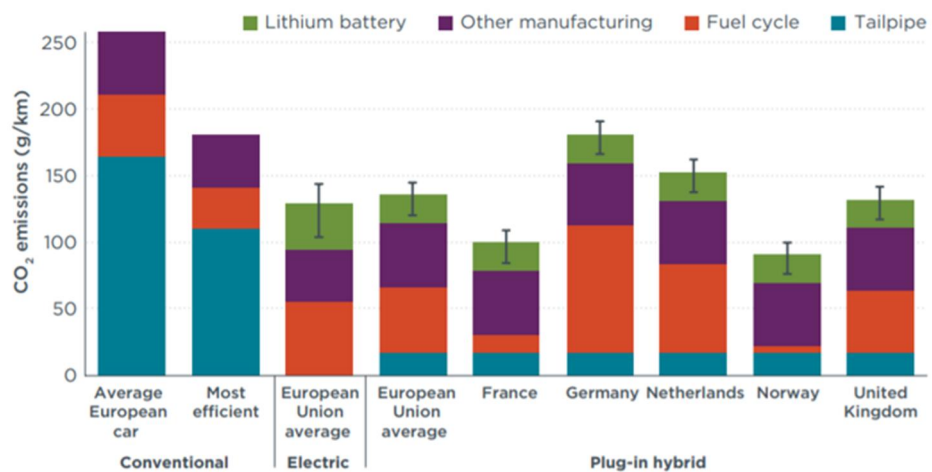
sähköntuotannosta riippuen sähköautot aiheuttavat 28 – 72 % vähemmän hiilidioksidipäästöjä elinkaarensa aikana. Kun vertaillaan Euroopan vähäpäästöisintä polttomoottoriautoa eli vuoden 2017 Peugeot 208 1.6 BlueHDia ja vuoden 2017 Nissan LEAF -sähköautoa, todettiin, että polttomoottoriauto aiheutti elinkaarensa aikana 29 % enemmän hiilidioksidipäästöjä (kuva 2). (The International Council On Clean Transportation 2018.)



Kuva 2 - Sähköauton ja polttomoottoriauton elinkaaripäästöjen vertailu 150000 ajatun kilometrin jälkeen (The International Council On Clean Transportation 2018).

Hybridiautojen kohdalla elinkaaren hiilidioksidipäästöt ovat lähes yhtä suuret kuin sähköautojen (kuva 3) (The International Council On Clean Transportation 2018).





Kuva 3 - Sähköauton, polttomoottoriauton ja hybridi-auton elinkaari-päästöjen vertailu 150000 ajetun kilometrin jälkeen (The International Council On Clean Transportation 2018).

### 2.3 Elinkaarikustannukset

Sähköauton ja polttomoottoriauton suurin ero ostohinnoissa tulee niiden erilaisesta voimalinjan rakenteesta. Sähköautoissa valtaosa hinnasta johtuu sen akuista. Niiden hinta on kuitenkin laskenut nopeasti viime vuosina. Litium-ioniakkujen hinta oli vuonna 2007 yli 1000 \$/kWh, ja vuonna 2014 noin 410 \$/kWh. Yleisesti ajatellaan, että akkujen hintojen tulisi pudota alle 150 \$/kWh, jotta sähköautojen ja polttomoottoriautojen ostohinnat kilpailisivat samalla hintatasolla. (Nykqvist & Nilsson, 2015.) Vuonna 2017 li-ion-akkujen hinta oli 250 \$/kWh. Nykyisin sähköauto maksaa ainakin 5000 euroa enemmän, kuin vastaavanlainen polttomoottoriauto. Sähköautojen hintoihin saattaa vaikuttaa myös alhaiset tuotantomäärät ja autojen lisäominaisuudet. (Cano ym. 2018.)

Sähköautoissa huoltoihin kuluu vähemmän rahaa. Katumaastureiden vertailussa vuonna 2015 polttomoottoriauton huoltoihin meni sen koko elinkaaren aikana 11800 \$ ja ajettua mailia kohden 0,059 \$. Sähköautolle elinkaaren aikana huoltoihin kului 8400 \$ ja ajettua mailia kohden 0,042 \$. (Karaaslan ym. 2018.)

### 2.4 Kierrätettävyyys

Polttomoottoriauton kierrätettävät materiaalit koostuvat täysin ajoneuvossa käytetyistä metalleista, jotka ovat enimmäkseen alumiinia, kuparia ja terästä. Loput materiaaleista

viedään polttolaitokseen purkamisen jälkeen. Sähköautoista saadaan niiden lisäksi akkupaketeista nikkeliä, kobolttia ja mangaania. Akuissa käytetty litium muuttuu kierrätysprosessissa litiumoksidiksi, jota käytetään betoniteollisuudessa. (Tagliaferri ym. 2016.)

## 2.5 Sähkö- ja paloturvallisuus

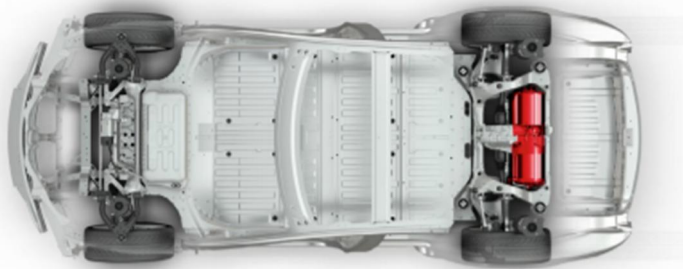
Sähköautojen yleistyessä niihin liittyvät onnettomuudet ovat myös yleistyneet. Suurin sähköauton turvallisuusriski on sen akut. Akkuihin liittyvät vahingot vaihtelevat akkukennon repeämisestä ja vuodosta aina tulipaloihin ja räjähdyksiin asti. Vakavimmat onnettomuudet aiheutuvat yleensä varastointi-, kuljetus- ja kierrätysvaiheissa, eikä niinkään akun varsinaisessa käytössä. (Abada ym. 2016.)

Akkujen vanhetessa niiden elektrolyytissä, anodissa ja katodissa tapahtuu muutoksia. Niiden vanhentumisprosessit voidaan luokitella kahteen eri kategoriaan: seurattaviin prosesseihin, joissa tapahtuu asteittaista rappeutumista tietyllä aikavälillä sekä niihin, joissa muutokset tapahtuvat nopeasti ja aiheuttavat vakavia ongelmia, eikä niitä voi seurata. Esimerkkinä nopeasti tapahtuvasta muutoksesta on dendriittikertymät litium-ioniakuissa. Akun vanhetessa pienet litium-partikkelit muodostavat akun anodiin dendriittejä, jotka aiheuttavat akussa oikosulun. Oikosulku aiheuttaa äkillisen nousun akun lämpötilassa ja johtaa akun katastrofaaliseen pettämiseen. Pahimmassa tapauksessa akku voi syttyä tuleen tai jopa räjähtää. (Rezvanizani ym. 2014.)

### 3 SÄHKÖAUTON VOIMALINJAN RAKENNE

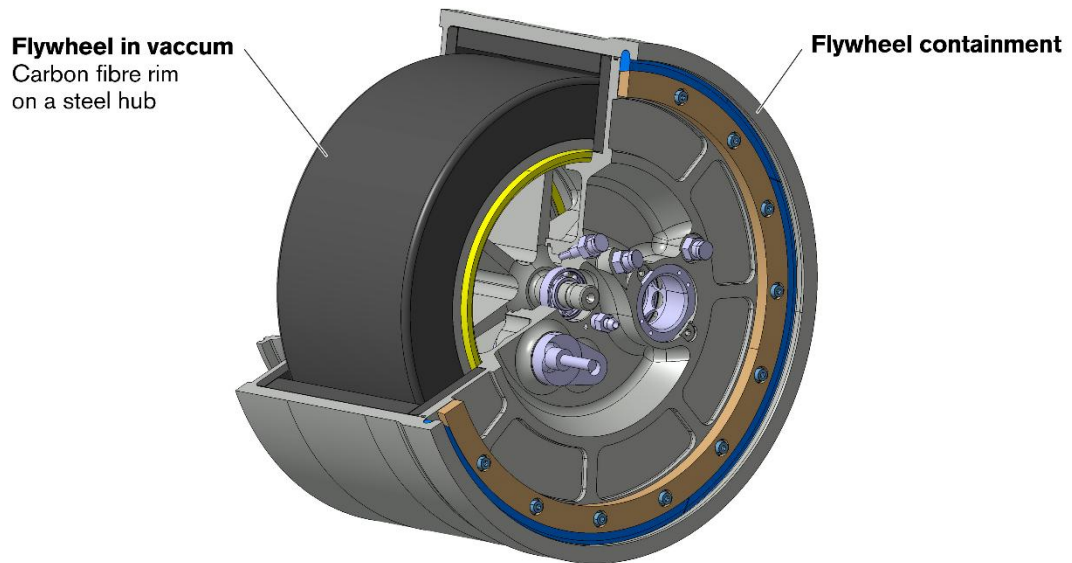
Voimalinjalla kuvataan auton niitä pääkomponentteja, joilla tuotetaan tehoa ja siirretään se tienpintaan. Sähköauton voimalinja koostuu pääsääntöisesti akkupaketista, sähkömoottorista, invertteristä, vaihdelaatikosta, vetoakseleista, sekä veto- ja tasauspyörästöstä. (Zhang ym. 2015.) Sähköautoissa käytetään yleisimmin kahta erilaista voimalinjarakennetta. Ensimmäinen on samantapainen kuin tavallisissa polttomoottoriautoissa, joissa on yksi keskeinen moottori. Toisessa rakenteessa jokaisessa vetävässä renkaassa on oma napamoottorinsa. (Manzetti & Mariasu, 2015.)

Nissan LEAF ja Chevrolet Bolt käyttävät voimalinjarakennetta, jossa yksi sähkömoottori on asennettu etuakselille pyörittämään molempia etupyöriä. Takavetoisista, yhden moottorin sähköautoista esimerkkinä toimii Teslan Model S (kuva 4). Sen moottori on asennettu taakse pyörittämään taka-akselin kautta takarenkaita. Tesla Model S -mallia myydään myös nelivetoisena, jossa etu- ja taka-akseleita pyörittää molempia oma moottorinsa. Napamoottoreita käyttämällä voidaan vähentää auton painoa, parantaa ajo-ominaisuuksia ja jättää enemmän tilaa akuille tai lastille. Niiden ongelmana on kuitenkin se, että moottorit ovat yhteydessä muuhun voimalinjaan johdoilla, jotka saattavat vahingoittua herkästi aiheuttaen suuria ongelmia. (Un-Noor ym. 2017.)



Kuva 4 - Tesla Model S takavetoisen mallin moottorin sijainti (Tesla 2019).

Sähköautojen voimalinjassa käytetään usein myös regeneratiivista jarrua. Regeneratiivisessa jarrutuksessa jarrutusenergia otetaan talteen akkuihin eri tekniikoita käyttämällä, pidentäen auton kantamaa. Yksi vaihtoehto regeneratiiviseksi jarruksi toimii vauhtipyörällä, joka hyödyntää jarrutuksessa aiheutuvaa kineettistä energiaa. Vauhtipyörä pyörittää generaattoria, joka puolestaan tuottaa tehoa. Yksi esimerkki tästä on F1-autoissa käytetty KERS-järjestelmä (kuva 5). (Un-Noor ym. 2017.)

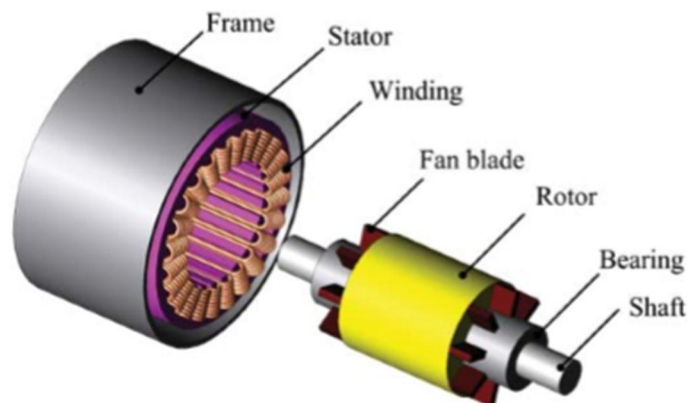


Kuva 5 - KERS-järjestelmä (EuroCar News 2019).

## 4 SÄHKÖMOOTTORIT JA INVERTTERIT

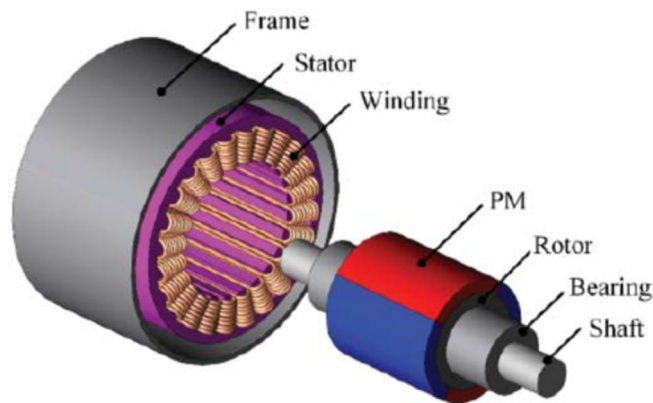
Sähkömoottorit ovat laitteita, joilla muunnetaan sähköenergia mekaaniseksi energiaksi. Sähköautoissa käytetyt moottorit ovat tasa- tai vaihtovirtamoottoreita. Polttomoottoriin verrattuna sähkömoottorilla on muutamia etuja. Sähkömoottoreiden hankintahinta on huomattavasti alhaisempi kuin polttomoottoreiden. Sähkömoottorit ovat myös huoltovarmempia, ne tarjoavat jopa 30000 tunnin huoltovapaan käyttöajan. Niiden huoltaminen on myös helpompaa ja halvempaa, koska sähkömoottorit ovat kooltaan pienempiä. Sähkömoottoreiden hyötysuhteet vaihtelevat 50 % ja 95 % välillä, riippuen moottorin koosta ja olosuhteista, missä moottoria käytetään. Sähkömoottoreiden suurin huono puoli on se, että niissä käytetään useimmiten harvinaisia maametalleja, mutta ei kuitenkaan kaikissa sähkömoottoreissa. Sähkömoottorit, joissa ei käytetä harvinaisia maametalleja, ovat halvempia ja useimmiten vaihtovirtamoottoreita. Esimerkiksi Teslan Roadster käyttää moottoria, jossa ei ole harvinaisia maametalleja (Racz ym. 2015.) Yleisimmät sähköautoissa käytetyt moottorit ovat induktimoottorit, kestopagneettimoottorit ja tasavirtamoottorit (Tuononen & Lajunen, 2016).

Induktiomoottoreista yleisimmin käytetty malli on häkkikäämitty oikosulkumoottori. Häkkikäämitty oikosulkumoottori koostuu staattorista, johon on sisällytetty kolmivaiheiset ankkurikäämit, ja roottorista, johon on sisällytetty tankomainen häkkikäämitys (kuva 6). Häkkikäämityn oikosulkumoottorin etuja ovat alhainen hinta ja vankkatekoisuus, mutta sen huono puoli on moottorin ohjauksen haastavuus. Siitä huolimatta häkkikäämitettyjä oikosulkumoottoreita käytetään laajasti sähköautoissa. (Chau 2015 s. 39-41.)



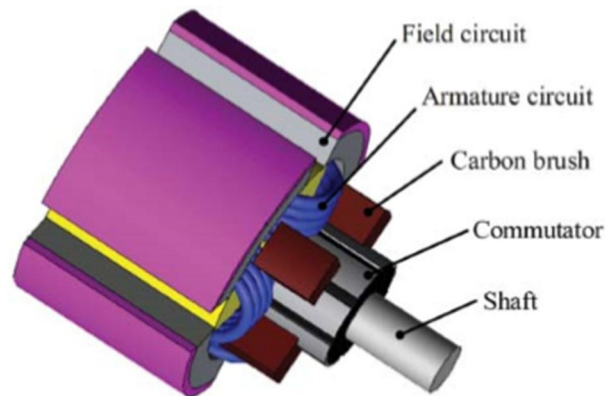
Kuva 6 - Häkkikäämityn oikosulkumoottorin rakenne (Chau 2015).

Kestomagneettimoottorit ovat tällä hetkellä houkuttelevimmat moottorivaihtoehdot sähköautoihin. Yleisimmät tyypit ovat harjaton kestopagneettimoottori ja synkroninen kestopagneettimoottori. Kestomagneettimoottorin rakenne on lähellä oikosulkumoottorin rakennetta. Siinäkin staattoriin on sisällytetty kolmivaiheiset ankkurikäämit, mutta roottorissa käytetään häkkikäämyksen sijaan kestopagneettisia elementtejä (kuva 7). Kestomagneettimoottorin hyviä puolia ovat korkea tehotehiheys ja hyötysuhde, pieni koko ja alhainen paino, kestopagneettimoottoria on helppo jäähdyttää ja se on luotettava. Korkeasta hinnastaan ja kestopagneettien lämpötilojen epävakaudesta huolimatta kestopagneettimoottorit ovat dominoimassa markkinoita (Chau 2015 s. 69-71.) Kestomagneetoitu tahtimoottori (PMSM) ei tarvitse erillistä vaihteistoa. Sitä voidaan käyttää napamoottoriratkaisuissa. (Un-Noor ym. 2017.)



Kuva 7 - Harjattoman kestopagneettimoottorin rakenne (Chau 2015).

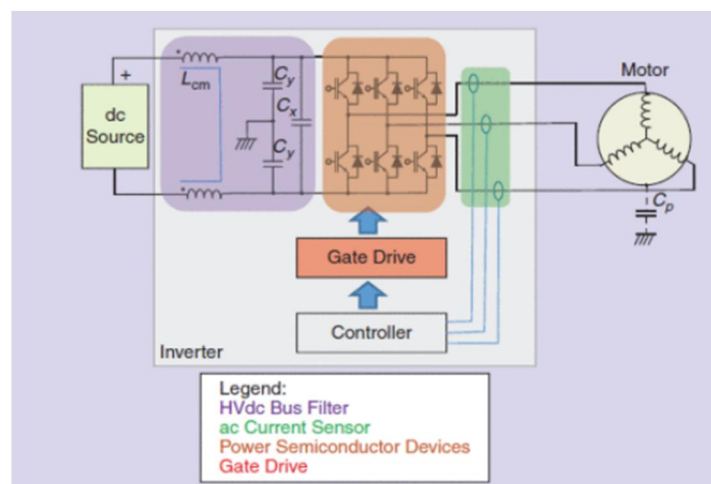
Tasavirtamoottorin hyviä puolia ovat niiden yksinkertaisuus ja pitkään koeteltu teknologia. Tasavirtamoottorit koostuvat pääosin staattorista, roottorista ja kommutaattorista (kuva 8). Ne kuitenkin yleensä häviävät hyötysuhteessa ja tehotehiheydessä vaihtovirralla toimiville moottoreille. Ne ovat myös kooltaan suurempia. (Chau 2015 s. 19-21.)



Kuva 8 - Tasavirtamoottorin rakenne (Chau 2015).

Synkroninen reluktanssimoottori (SynRM) tuo induktio- ja kestopagneettimoottoreiden hyödyt yhteen. Ne ovat vankkatekoisia, tehokkaita ja pienikokoisia. Huonoja puolia ovat heikko ohjattavuus ja matala tehokerroin. Tehokertoimen parannus voidaan tehdä lisäämällä SynRM-moottorin roottoriin kestopagneettia (PM assisted SynRM). Näitä moottoreita käytetään kuitenkin harvoin sähköautoissa. (Un-Noor ym. 2017.)

Invertteri, eli vaihtosuuntaaja kiihdyttää tai jarruttaa ajoneuvoa muuntamalla akuissa olevan tasavirran moottorille sopivalla taajuudella olevaksi vaihtovirraksi (kuva 9). Invertteriltä vaadittavia ominaisuuksia ovat pieni koko, korkea hyötysuhde, tehokkuus ja luotettavuus. Pieni koko takaa helpon asentamisen ja säästää painossa, korkea hyötysuhde pidentää auton kantamaa ja tehokkuus mahdollistaa vaadittavan kiihdytyksen. (Kimura ym. 2014.)



Kuva 9 - Tavanomaisesti autoissa käytetyn invertterin kytkentäkaavio (Schultz 2017).

Sähköautoissa käytetään pitkälti kolmivaiheista virtaohjattua jännitelähteinvertteriä. Invertterin yksi pääkomponenteista on sen puolijohdelaite. Puolijohdelaite vaikuttaa muun muassa kytkentähäviöön, mitoitusjännitteeseen ja -virtaan. Yleisimmin sähköautoissa käytetään IGBT-puolijohdetta (insulated gate bipolar transistor), toinen yleinen ratkaisu on MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor). Piikarbidi-puolijohde (SiC) on esimerkki MOSFET-rakenteesta. Korkeajännitteisempiin järjestelmiin SiC tuo kilpailua ja uusia mahdollisuuksia IGBT:hen verrattuna. MOSFET on kaksisuuntainen laite, eli siinä virta kulkee molempiin suuntiin. IGBT on sen sijaan yksisuuntainen, eli se tarvitsee rinnakkaisen diodin, jolla on vastakkaiset napaisuudet, jotta virta kulkisi molempiin suuntiin laitteessa. Korkeajännitteisissä järjestelmissä SiC voi muun muassa vähentää kytkentähäviötä ja parantaa hyötysuhdetta. SiC:n ongelma on kuitenkin sen korkea hinta. (Schultz 2017.)



## 5 AKKUJEN KEMIA JA LÄMMÖNHALLINTA

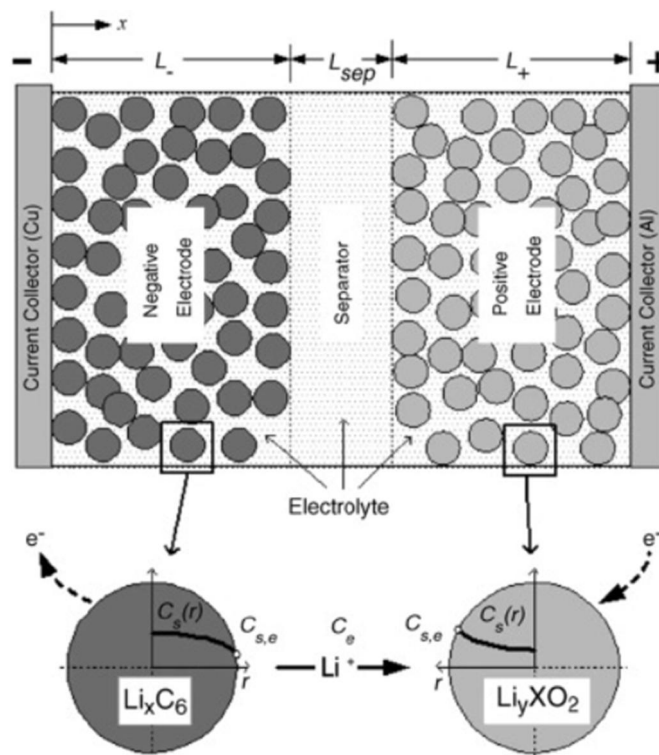
### 5.1 Akkutyytit

Akuilla varastoidaan kemiallista energiaa ja muunnetaan se sähköksi. Akkuteknologiassa on kaksi perustavanlaatuaista ominaisuutta, jotka vaikuttavat muun muassa suorituskyykyyn ja kestävyys eli tehosiheys ja energisiheys. Tehosiheys tarkoittaa energiamäärää, minkä akku pystyy toimittamaan tietyn ajan kuluessa ja energisiheys tarkoittaa energiamäärää, minkä akku pystyy varastoimaan (Racz ym. 2015.) Sähköautoissa akut koostuvat useista kennoista. Kennot voivat olla muodoltaan esimerkiksi sylintereitä, prismaattisia, nappimaisia tai pussimaisia. Esimerkiksi Tesla Model S -mallissa 85 kWh:n akussa on 7104 sylinterimäistä li-ion-kennoa. (Un-Noor ym. 2017.)

Akun varaustila määritellään prosenttiosuutena akun kapasiteetista. Varaustila on vastaava polttomootoriauton polttoainemittarille. Akun varaustilan tarkka arviointi auttaa tietämään akussa jäljellä olevan energiamäärän ja kertoo auton toiminnasta. Varaustilan arviointi on kuitenkin haastavaa, koska siihen vaikuttavat monet ulkoiset ja sisäiset tekijät. Myös ikääntyminen, lämpötilavaihtelut ja lataus-purkaussyklit vaikuttavat varaustilaan. Akun varaustila tulisi pitää 20 % ja 95 % välillä. (Xiong ym. 2017.) Akun varaustila laskee lämpötilan laskiessa alle 30 °C. Kylmemmällä ilmalla akku ei pysty purkamaan kapasiteettiaan yhtä tehokkaasti ja varaustila laskee nopeammin. (Duong ym. 2017.) Akun ylipurku voi vahingoittaa akkua vähentäen sen kapasiteettia ja lyhentäen käyttöikä, sekä häiritä akun kemialla ja aiheuttaa akun savuamista. Myös akun ylläpitäminen vahingoittaa akkua. Akku voi jopa syttyä tuleen ylläpitäksen johdosta. (Raj 2018.)

Yleisin sähköautoissa käytetty akkutyyppi on litium-ioniakku. Yksinkertaistettuna litium-ioniakkukkenno koostuu negatiivisesta ja positiivisesta elektrodista, elektrolyytistä, erotimesta ja virranottimesta (kuva 10). (Fotouhi ym. 2016.) Muihin akkutyyppisiin verrattuna litium-ioniakuilla on korkea energisiheys, pitkä käyttöikä ja ne ovat ympäristölle ystävällisiä. Se on myös kierrätettävä akku. Kyseisten hyötyjen ansiosta litium-ioniakut ovat levinneet moniin eri käyttötarkoituksiin. Ajoneuvoissa litium-ioniakkujen suurimmat ongelmat ovat niiden kestävyys, turvallisuus ja hinta. Akkuja tarvitsee käyttää turvallisten rajojen sisäpuolella, mitä rajoittavat lämpötila ja jännite.

Rajojen ylittäminen voi johtaa akun nopeaan heikkenemiseen ja voi aiheuttaa turvallisuusriskin. Esimerkiksi akkuvalmistajien mukaan akun käyttölämpötilojen tulee olla purkautuessa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä, ja ladataessa  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  välillä. (Lu ym. 2013.) Akun korkea varaustila, eli yli 80 % vahingoittaa akkua ja lyhentää sen käyttöikää. Myös varauksen laskiessa alle 10 % akun koko kapasiteetista akku heikkenee. (Barré ym. 2012.) Li-ioniakkuja on mahdollista ladata nopeasti ja esimerkiksi sähköbussseja voidaan ladata osittain bussipysäkeillä pysähdysten ajan, mutta se voi nopeuttaa kennojen rappeutumista ja aiheuttaa turvallisuusongelmia. Muihin akkutyyppeihin verrattuna Li-ioniakkujen pikalataussoveltuvuus on kuitenkin paras (kuva 13). Useiden ajoneuvon samanaikainen pikalataaminen voi aiheuttaa liiallista rasitusta sähköverkkoon. (Cano ym. 2018.) Litium-ioniakkuja on kehitetty täyttämään eri spesifikaatioita erilaisilla kemiallisilla yhdisteillä. Niillä pyritään lisäämään akkujen energiatiheyttä ja luotettavuutta. Yhdisteitä on muun muassa litium-kobolttioksidi, litium-mangaanioksidi ja litium-rautafosfaatti. Litium-kobolttia käytetään esimerkiksi Tesla Roadsterissa, litium-mangaania Nissan LEAFissä ja litium-rautafosfaattia Mitsubishi iMiEV:ssä (Fotouhi ym. 2016.)



Kuva 10 - Litium-ioniakkukennon rakenne (Fotouhi ym. 2016).

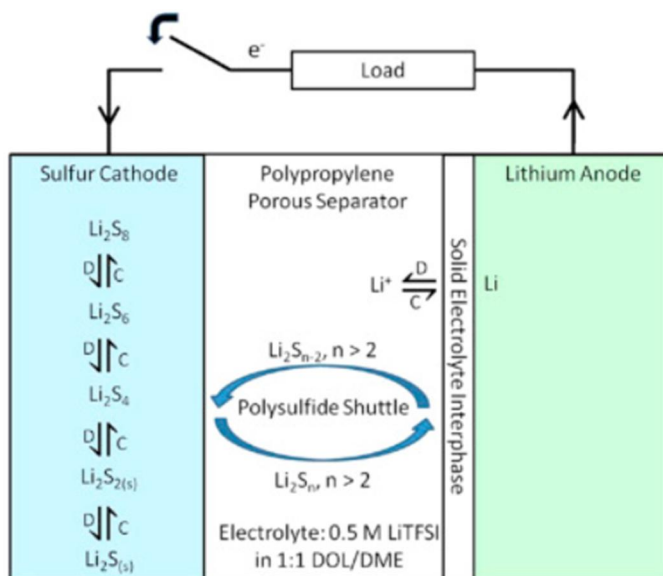
Halvimmat akkutyypit ovat lyijyakut. Ne ovat myös yleisimmät käytetyt akkutyypit. Niiden alhaisen energiatheyden takia ne ovat käytännöllisiä ainoastaan lyhyen matkan sähköautoissa. Niillä on myös lyhyempi käyttöikä ja ne ovat kooltaan suurempia kuin Li-ion-akut. Nämä ominaisuudet tekevät niistä huonompia akkuja Li-ion-akkuihin verrattuna. Ne toimivat kuitenkin alhaisemmissa lämpötiloissa, jopa  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Niiden lataaminen on erittäin turvallista ja ne kestävät hyvin pikalatausta (kuva 13). Avustavassa roolissa lyijyakut ovat suosittuja. Lyijyakkuja kehitetään lähinnä regeneratiivisen jarrun lataukseen liittyen. Siinä akulta vaaditaan satoja tuhansia korkeatehoisia mikrosyklejä osittaisella varauksella. Tavallisissa lyijyakuissa korkeatehoiset syklit aiheuttavat isoja lyijysulfaattikristalleja, jotka vahingoittavat sen kykyä nopeaan latautumiseen. Ongelmaa on ratkaistu lisäämällä akkuihin erilaisia hiiliyhdisteitä. Lyijy-hiiliakut ovat lupaavia halpoihin hybridiautoihin ja täyssähköautoihin, joissa on toinenkin energialähde. (Cano ym. 2018.)

Nikkeli-metallihydridiaku on yleisin nikkelpohjainen akkutyyppi. Ne tarjoavat huomattavasti paremman suorituskyvyn lyijyakkuihin verrattuna, mutta ovat myös niitä kalliimpia nikkelin korkean hinnan vuoksi. Ne ovat myös litium-ioniakkuja kalliimpia, koska Li-ion-akkujen hinnat ovat tulleet nopeasti alaspäin. Ne olivat suosituin akkutyyppi hybridiautoille aina viime aikoihin asti. Akkujen teknologia on jo hyvin optimoitu regeneratiivisen jarrun kanssa. Hyviä puolia on myös nikkeli-metallihydridiakkujen harmittomuus luonnolle ja niiden kierrätettävyys. (Cano ym. 2018.) NiMH-akut kestävät suhteellisen heikosti pikalatausta ja ylivarausta. Pikalatauksessa voi aiheutua korkeita lämpötiloja. Niillä on myös ongelmia itsepurkautumisen kanssa ja rajallinen käyttöikä. (Hu ym. 2017.) Turvallisuutensa vuoksi NiMH-akkuja voidaan asentaa autossa paikkoihin, jotka ovat alttiita iskuille, toisin kuin litiumpohjaisia akkuja. Tästä syystä on ehdotettu, että NiMH-akuilla voisi korvata rakenteellisia komponentteja kantomatkan pidentämiseksi. Koska NiMH-akut toimivat hyvin alhaisissa lämpötiloissa, ne voisivat olla myös hyvä vaihtoehto moottorin käynnistyksessä etenkin kylmissä ilmastoissa. (Cano ym. 2018.)

Natrium-rikkiakut tulivat markkinoille 60-luvulla Fordin varhaisissa sähköautoyrityksissä. Na-S-akkuja käytetään nykyään lähinnä sähköverkoissa suuren mittakaavan energianvarastointitarpeissa, kuten tuulivoimaloissa ja aurinkosähkövoimaloissa. Na-S-akuilla on korkea energiatiheys ja pitkä käyttöikä, ne kestävät 2500 – 4000 lataus-purkauskertaa. Akut pystyvät myös purkautumaan nopeasti ja toimivat kuumissa ja

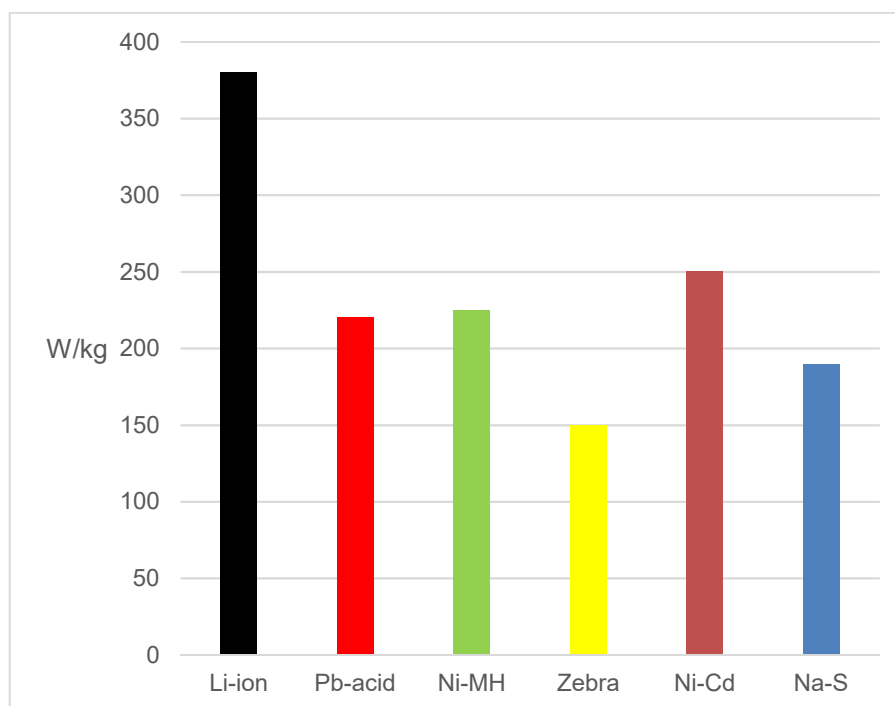
rankoissa olosuhteissa. Akut ovat kuitenkin vaarallisia natriumin takia. Natrium voi syttyä spontaanista, jos se joutuu ilman ja kosteuden kanssa tekemisiin. (Hu ym. 2017.)

Litium-ioniakkujen teoreettisen energiatihyeden maksimin lähestyessä, niille yritetään etsiä korvaavaa akkutyyppeä. Yksi mahdollinen ratkaisu on litium-rikkiakut. Litium-rikkiakkukkenno koostuu positiivisesta rikkielektrodista ja negatiivisesta litiumelektrodista (kuva 11). Kennossa voi tapahtua erilaisia reaktioita, mutta yleisesti purkautumisprosessissa rikki pelkistyy polysulfideiksi ja litium hapettuu litium-ioneiksi. Latautuessa prosessi on vastakkainen. (Fotouhi ym. 2016.) Kiinnostus litium-rikkiakkuihin johtuu niiden 4,5 kertaisesta teoreettisesta litium-kapasiteetista litium-ioniakkuihin verrattuna (Cano ym. 2018). Muita etuja litium-ioniakkuihin verrattuna on niiden korkeampi energiatiheys, parempi turvallisuus, laajempi käyttölämpötila-alue ja halvempi hinta rikin saatavuuden vuoksi. Sitä ei kuitenkaan ole otettu vielä laajempaan käyttöön. Litium-rikkiakkujen suurin ongelma on niiden lyhyehkö käyttöikä. (Fotouhi ym. 2016.) Litium-rikkiakut eivät ole kestäneet yli 500 lataus-purkauskertaa. Rikkikatodien ongelmia on muun muassa se, että niiden tilavuus vaihtelee suuresti kiertojen aikana. (Cano ym. 2018.) Litium-rikkiakut kärsivät myös korkeasta itsepurkautumisesta ja kapasiteetin heikentymisestä korkeissa purkausvirroissa (Fotouhi ym. 2016).



Kuva 11 - Litium-rikkiakkukennon rakenne (Fotouhi ym. 2016).

Toinen tulevaisuudessa mahdollinen akkuratkaisu on natrium-nikkeli-kloridiakku, eli Zebra-akku. Sillä on monia etuja, kuten alhainen hinta, turvallisuus ja pitkä käyttöikä. Se kestää yli 1000 lataus-purkauskertaa ja sen varaustila voi laskea jopa täysin tyhjäksi vahingoittamatta sen käyttöikää, toisin kuin monilla muilla akuilla. Akkujen teho on kuitenkin alhainen muihin yleisimpiin akkutyyppeihin verrattuna (kuva 12). Alhaisen tehonsa vuoksi Zebra-akut eivät pysty toimimaan ainoana virtalähteenä sähköautokäytössä. (Andwari ym. 2017.) Ratkaisu tehon puutteeseen on käyttää Zebra-akkujen rinnalla superkondensaattoreita (Dixon ym. 2010).

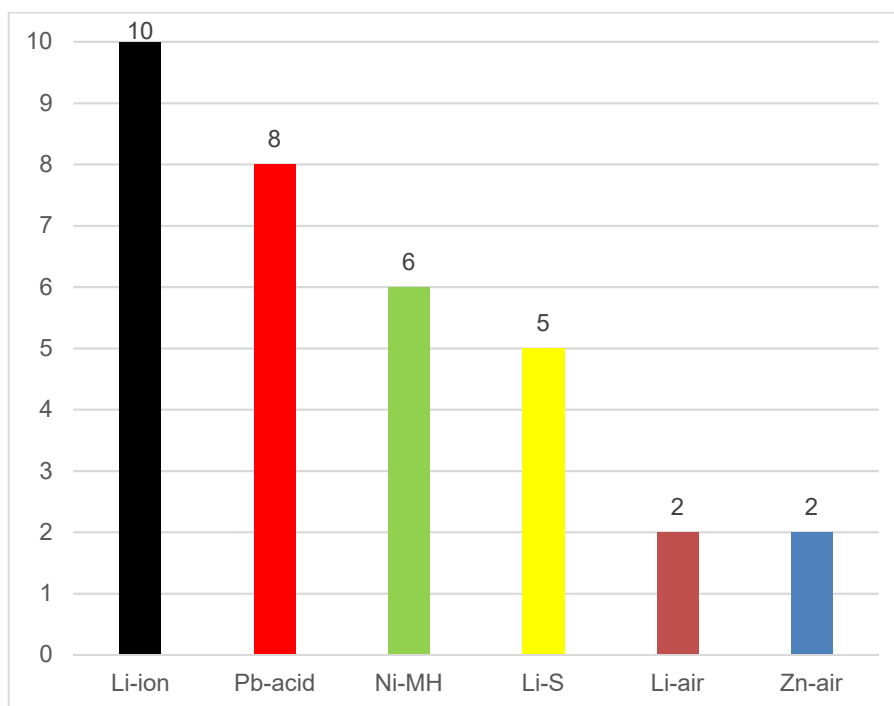


Kuva 12 - Sähköautoissa käytettyjen akkutyyppien ominaistehoja (Dixon ym. 2010).

Litium-ilma-akut tarjoavat suurempaa energiatiheyttä ja ominaisenergiaa litium-rikki-akkuihin verrattuna, koska ne käyttävät ilman happea tuottaakseen tehoa. Niiden käyttöikä on kuitenkin huomattavasti alhaisempi, niillä päästään vain noin 100 lataus-purkauskertaan. Litium-ilma-akkujen käyttöiän pidentäminen on osoittautunut hyvin vaikeaksi useiden eri ongelmien takia. Ongelmia on muun muassa katalyytin rappeutuminen korkeajännitteisestä latauksesta, litiumin reagointi ilmankosteuteen ja elektrolyytin peruuttamaton hajoaminen. Lisäksi akkujen ominaistehon ja energiatehokkuuden oletetaan olevan muita akkuja huomattavasti heikompi, vaikka luotettavia tutkimuksia ei ole vielä tehty. Litium-ilma-akut kestävät heikosti pikalatausta (kuva 13). Alhaisen hintansa ja korkean energiatihedyn takia ne ovat silti kiinnostava

vaihtoehto pitkän kantaman edullisiin sähköautoihin. Litium-ilma-akku vaatisi kuitenkin vierelleen korkeatehoisen akun alhaisen ominaistehonsa vuoksi. (Cano ym. 2018.)

Sinkki-ilma-akkujen osuus sähköautojen akkuina oletetaan nousevan lähitulevaisuudessa. Vaikka sinkki-ilma-akkujen ominaisenergia on alhaisempi kuin litium-ilma-akkujen, korkeampi käytännöllisesti saavutettava energiatiheys tekee niistä houkuttelevamman vaihtoehdon. Ladattavat sinkki-ilma-akut tunnistettiin lupaaviksi ehdokkaiksi autojen sähköistämisessä vuosikymmeniä ennen Li-ioniakkujen tuloa. Samoin kuin litium-ilma-akut, sinkki-ilma-akut vaatisivat vierelleen korkeatehoisemman akun alhaisen tehotiheyden takia. Niiden vierelle voitaisiin asentaa esimerkiksi korkeatehoinen lyijyakku. Toinen vaihtoehto olisi niiden käyttäminen litium-ioniakkujen rinnalla kantaman pidentämislaitteissa, koska niillä on lyhyt käyttöikä. Kantaman pidentämislaitteissa akun lyhyt käyttöikä ja alhainen tehokkuus ovat suhteellisen vähämerkityksellisiä, jos pidempää kantamaa tarvitaan harvoin. Sinkki-ilma-akut eivät myöskään kestä pikalatausta hyvin (kuva 13). Samoin kuin NiMH-akut, sinkki-ilma-akut ovat turvallisia ja niitä voidaan laittaa iskuille alttiisiin paikkoihin autossa. Sinkki-ilma-akkujen tulevaisuus riippuu siitä, pystytäänkö niiden käyttöikää pidentämään. Se voidaan saavuttaa muun muassa vähentämällä tai poistamalla hiili ilmaelektrodissa. (Cano ym. 2018.)

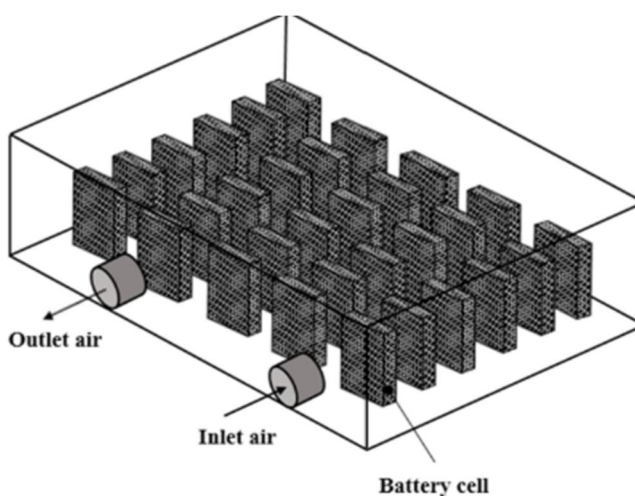


Kuva 13 - Eri akkutyypin soveltuvuus pikalataukseen, 0=huono ja 10=erinomainen (Cano ym. 2018).

## 5.2 Jäähdytystarve ja -hallinta

Akut tuottavat suuren määrän lämpöä purkautuessaan, minkä takia niiden jäähdytyslaitteet ovat tärkeä osa sähköautoa. Jäähdytyslaitteilla voidaan pidentää akkujen käyttöikää ja parantaa niiden suorituskykyä huomasti. Niiden tehtävänä on pitää akkujen käyttölämpötila niille optimaalisena ja tasoittaa lämpötilaeroja. Jäähdytyslaitteilla on tiettyjä vaatimuksia, kuten sen tulee olla kompakti, kevyt, luotettava ja helposti saatavilla huoltoa varten. (Pesaran 2001.)

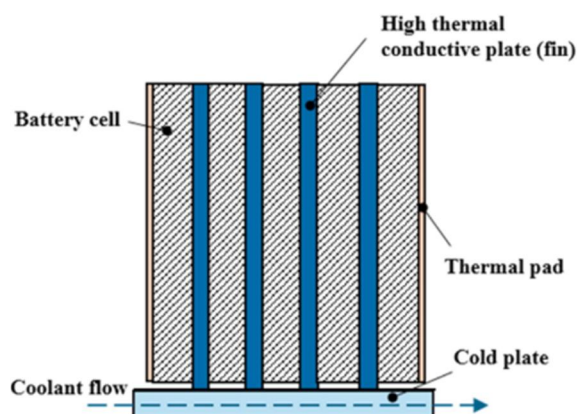
Ilmaa käyttävät laitteet ovat yleensä yksinkertaisempia ja halvempia, mutta niiden suoritusteho on rajallista varsinkin korkeatehoisissa kohteissa, joissa lämpöä syntyy paljon. (Hunt ym. 2016.) Jäähdyttimen käyttämä ilma voidaan ottaa ulkoa, auton hytistä tai lauhduttimesta, joka on joissain tapauksissa konfiguroitu tavanomaisiin ilmajäähdytyslaitteisiin. Ilmajäähdytys toimii puhaltamalla viileää ilmaa akkukennoihin, mistä se sitten poistuu (kuva 14). Ilmajäähdytin vaatii suuren putkiston pitääkseen lämpötilat vakaina, koska ilmalla on alhainen lämpökapasiteetti ja lämmönjohtokyky. Lisäksi se aiheuttaa meluhaittaa. (Kim ym. 2019.)



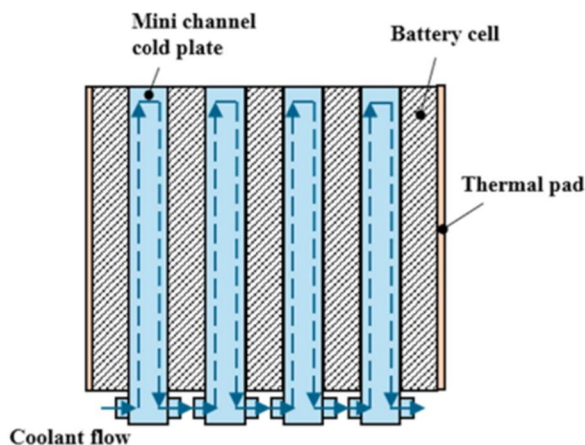
Kuva 14 - Ilmajäähdytyslaitteen rakenne (Kim ym. 2019).

Yleisesti nesteellä toimivat jäähdytyslaitteet pystyvät poistamaan lämpöä huomattavasti tehokkaammin ja mahtuvat pienempään tilaan kuin ilmalla toimivat jäähdytyslaitteet, mutta monimutkaisemman rakenteensa vuoksi siitä aiheutuu enemmän painoa, huoltaminen on vaikeampaa ja putkistossa voi esiintyä vuotoja. Nesteellä toimivia jäähdytyslaitteita on kahta eri tyyppiä. Ensimmäisessä tyypissä akkukenttien välissä

menee ripoja, jotka on kiinnitetty yhteen kylmälevyyn (kuva 15). Akkukennojen lämpö siirtyy ripoihin ja sen jälkeen kylmälevyn sisällä kulkevaan jäähdytysnesteeseen, josta se vapautuu ulkoilmaan. Tässä tyypissä kennojen lämpötilaerot jakaantuvat tasaisesti, mutta ajan kanssa sen jäähdytyskyky heikkenee, kun nesteen ja ripojen lämpötilaero pienenee. Toisessa tyypissä akkukennojen välissä on pieniä kylmälevykanavia, joissa kulkee jäähdytysneste (kuva 16). Tässä tyypissä ei ole samaa ongelmaa kuin ripoja käyttävässä järjestelmässä, mutta järjestelmä vaatii pitkiä kapeita kanavia ja se johtaa korkeaan painehäviöön. Järjestelmä vaatii tehokkaamman pumpun ja se tarkoittaa suurempaa energiankulutusta. (Kim ym. 2019.)



Kuva 15 – Nestejäähdytysjärjestelmän rakenne, jossa on ripoja (Kim ym. 2019).

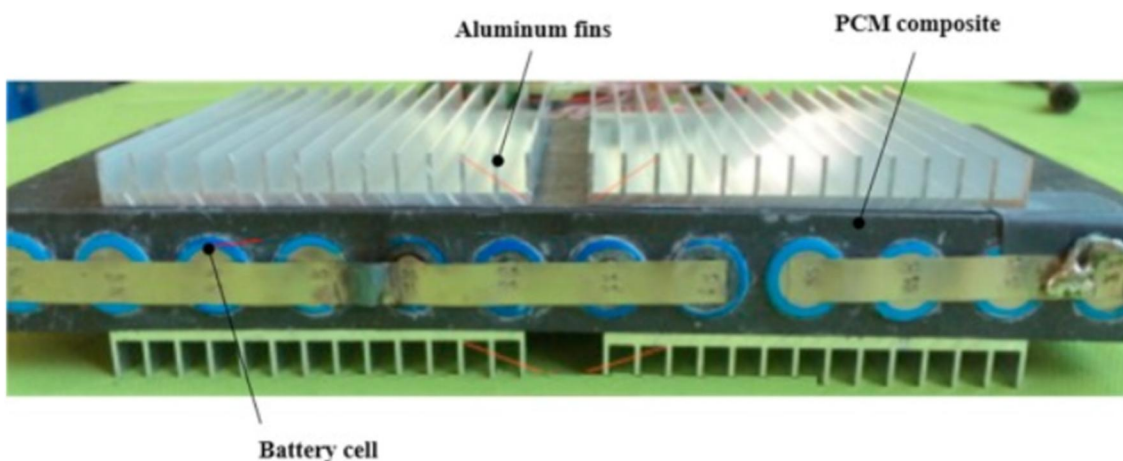


Kuva 16 – Nestejäähdytysjärjestelmän rakenne, jossa on kylmälevykanavia (Kim ym. 2019).

Faasimuutokseen perustuva jäähdytysjärjestelmä (PCM) toimii aineella, joka muuttaa olomuotoaan tietyssä lämpötilassa. Sillä pystytään absorboimaan tai vapauttamaan suuria määriä lämpöä ilman energiankulutusta. Järjestelmässä akkukennot on upotettu

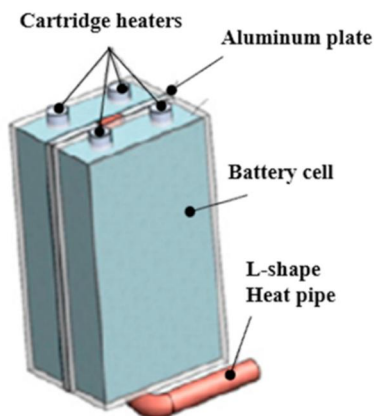


kiinteässä muodossa olevaan aineeseen ja siinä on kaksi levyä joko ylhäällä ja alhaalla tai sivuilla, jotka vapauttavat absorboitua lämpöä (kuva 17). Järjestelmässä käytetyn aineen latenttilämpö, lämpökapasiteetti ja lämmönjohtokyky pitää olla korkeita. Aineen pitää myös olla myrkytöntä ja kemiallisesti stabiilia. Parafiiniä pidetään parhaana aineena tähän, huono puoli siinä on kuitenkin heikko lämmönjohtokyky. PCM on huono lämmönsäätelyjärjestelmä yksinään, jos siinä käytetty aine on jatkuvasti nestemäisenä korkean ulkoilman lämpötilan tai akun jatkuvien lataus- ja purkusyklien takia. Siitä syystä PCM tarvitsee vierelleen jäähdytysjärjestelmän, joka siirtää lämpöä ulos. (Kim ym. 2019.)



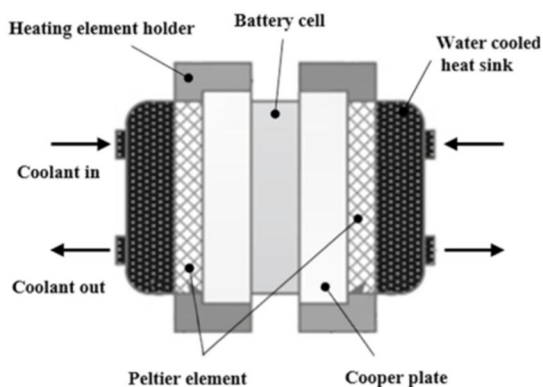
Kuva 17 - Faasimuutokseen perustuva lämmönsäätelyjärjestelmä (Kim ym. 2019).

Lämpöputki on laite, joka toimii spontaanisti ilman ulkoista virtaa. Se pystyy siirtämään suuria määriä lämpöä huomattavia matkoja nopeasti. Lämpöputki on kooltaan kompakti ja sen geometria on joustava. Se on pitkäikäinen ja helppohoitoinen. Niitä ei kuitenkaan käytetä vielä yleisesti sähköautoissa niiden alhaisen lämpökapasiteetin, alhaisen hyötysuhteen ja pienen kosketuspinta-alansa takia. Lämpöputki koostuu höyrystinosasta, adiabaattisesta osasta ja lauhdutinosasta. Höyrystin kiinnitetään lämmön aiheuttajaan. Putkessa oleva neste höyrystyy absorboimalla lämpöä ja höyry siirtyy adiabaattisen osan kautta lauhduttimeen säiliön paine-erojen avulla. Lauhduttimessa höyry muuttuu jälleen nesteeksi siirrettyään lämmön pois ja siirtyy sitten höyrystinosaan. Neste siirtyy takaisin höyrystimeen erilaisilla tavoilla. Prosessi pystytään toistamaan ilman ulkoista energiankulutusta. Lämpöputket ovat kosketuksissa akkukennoihin, jotta järjestelmä pystyisi viilentämään kennoja (kuva 18). Koska putken pinta-ala on pieni, lämpöputkiratkaisua pystytään käyttämään parhaiten prismaattisissa tai pussin mallisissa akkukennoissa. (Kim ym. 2019.)



Kuva 18 – Lämpöputkijärjestelmän rakenne (Kim ym. 2019).

Lämpösähköiseen ilmiöön perustuva jäähdytysjärjestelmä on saanut suurta kiinnostusta osakseen viimeisten vuosikymmenten aikana ympäristöystävällisyytensä vuoksi. Lämpösähköiset järjestelmät jaetaan Seebeck-ilmiöön perustuviin ja Peltier-ilmiöön perustuviin ryhmiin. Seebeckissä lämpöenergia muutetaan sähköksi ja Peltierissä sähkö muutetaan lämpöenergiaksi. Peltier-ilmiöön perustuvia jäähdytysjärjestelmiä kutsutaan lämpösähköisiksi jäähdyttimiksi (TEC). TEC koostuu erityyppisistä puolijohteista, jotka vuorottelevat kahden ohuen keraamisen piikiekon välillä ja käyttää Peltier-ilmiötä luodakseen lämpövaihteluita. Järjestelmän yläosa on kiinnitetty akkuun ja alaosa kylmälevyyn, jossa kulkee vesi tai ilma, joka kuljettaa lämmön pois (kuva 19). Kun TEC-järjestelmään virtaa tasasähköä, akuista aiheutuva lämpö siirtyy ylhäältä alas, jonka takia yläosa jäähtyy ja se jäähdyttää akkua. Järjestelmä voi myös lämmittää akkuja kääntämällä virran suunnan. Koko järjestelmä on kooltaan pieni, se on huoltovarma, sillä on pitkä käyttöikä ja se on hiljainen. Hyvistä puolistaan huolimatta TEC-järjestelmää ei aktiivisesti kehitetä sähköautokäyttöön sen alhaisen hyötysuhteen takia. (Kim ym. 2019.)



Kuva 19 - Nestekäyttöinen TEC-järjestelmä (Kim ym. 2019).

## 6 TOTEUTUNEITA VOIMALINJARATKAISUJA

Nissan LEAF -autossa käytetään kestopagneettimootoria (PMSM) (Un-Noor ym. 2017). Moottori on teholtaan 110 kW. Auto kiihtyy 0 – 100 km/h 7,9 sekunnissa, ja sen huippunopeus on 145 km/h. LEAFin moottori on asennettu etuakselille, ja se on etuvetoinen. Autossa on myös vakiona regeneratiivinen jarru. Auto painaa 1995 kg. Siinä on kapasiteetiltaan 40 kWh:n litium-ioniakut. (Nissan 2019.) Akkujen jäähdytys tapahtuu passiivisella ilmajäähdyttimellä (Bizzarri 2018).

Tesla Model S -autossa käytetään induktiomootoria (Un-Noor ym. 2017). Perusmallin moottoriteho on 285 kW. Se kiihtyy 0 – 100 km/h 5,2 sekunnissa, ja sen huippunopeus on 225 km/h. Model S on tarjolla joko taka- tai nelivetoisena. Nelivetomallissa on kaksi mottoria, toinen edessä ja toinen takana. Auto painaa 2241 kg. Tesla Model S:n litium-ioniakkujen kennot ovat muodoltaan sylinterimäiset ja ne ovat joko 70 kWh tai 85 kWh kapasiteetiltaan. (Tesla 2019.) Akkujen jäähdytys tapahtuu nestejäähdytysjärjestelmällä, jossa on kylmälevykanavia (Bizzarri 2018).

BMW i3 -autossa käytetään kestopagneettiavusteista synkronista reluktanssimootoria (PM assisted SynRM) (Un-Noor ym. 2017). Moottorin huipputeho on 125 kW. Auto kiihtyy 0 – 100 km/h 6,9 sekunnissa ja sen huippunopeus on 150 km/h. BMW i3 on takavetoinen auto, jossa yksi moottori on sijoitettu taka-akselille. Auto painaa 1290 kg. Autossa käytetään lithium-ioniakkuja, jotka saa joko 42 kWh tai 38 kWh kapasiteettisina. (BMW 2018.) Akkujen jäähdytys tapahtuu kylmäainekäyttöisellä jäähdytysjärjestelmällä (Wickramaratne 2017).

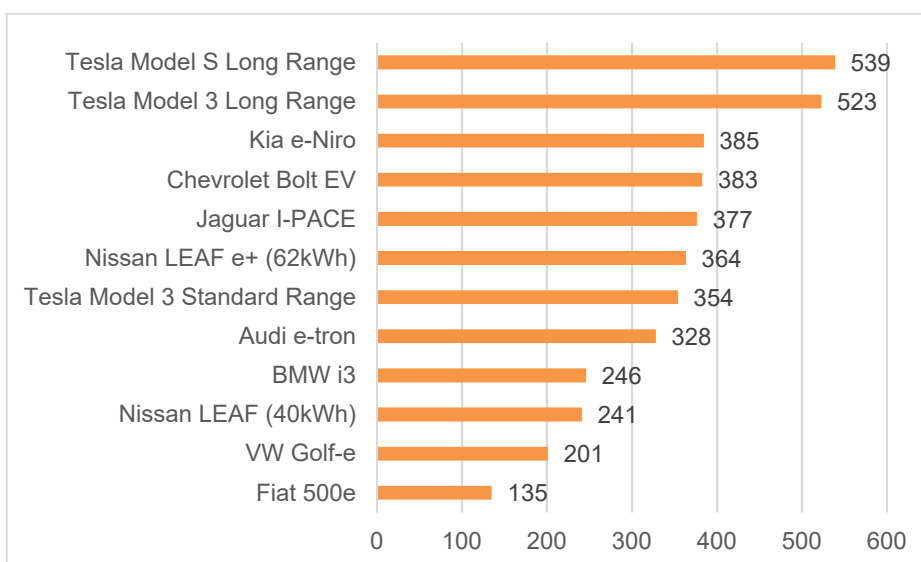
Chevrolet Bolt toimii 149 kW:n tehoisella kestopagneettimootorilla ja siinä on 60 kWh:n litium-ioniakut (Chevrolet 2017). Akkujen jäähdytys tapahtuu nestejäähdytysjärjestelmällä, jossa on ripoja (Bizzarri 2018). Auton moottoriteho on 149 kW. Se kiihtyy 0 – 100 km/h 6,5 sekunnissa ja sen huippunopeus on 146 km/h. Akkukennot ovat muodoltaan pussimaisia. Se on etuvetoinen auto ja moottori on asennettu etuakselille. Chevrolet Boltissa on regeneratiivinen jarru vakiona. Auto painaa 1616 kg. (Chevrolet 2017.)

Jaguar I-Pace toimii samantyyppisellä kestopagneettimootorilla kuin Nissan LEAF (PMSM), mutta Jaguarissa niitä on kaksi. Ne ovat yhteistehoilta 290 kW. Toinen moottori on etuakselilla ja toinen taka-akselilla, eli se on nelivetoinen. Auto kiihtyy 0 – 100 km/h 4,8 sekunnissa ja sen huippunopeus on 200 km/h. Autossa on myös regeneratiivinen jarru vakiona. Jaguar I-Pace painaa 2133 kg. Siinä on 90 kWh:n lithium-ioniakut, joiden kennot ovat muodoltaan pusseja. Akkujen jäähdytys tapahtuu nestejäähdytysjärjestelmällä. (Jaguar 2019.)

## 7 SÄHKÖAUTON TULEVAISUUS JA SIIHEN LIITTYVÄT HAASTEET

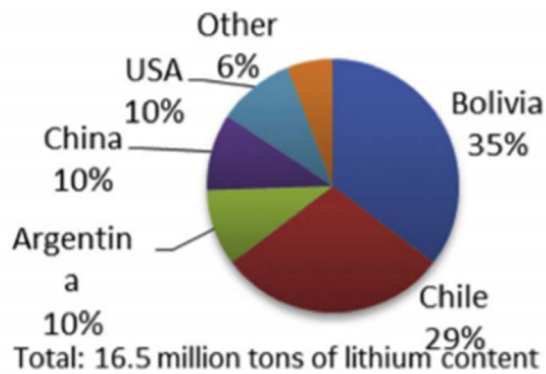
Sähköautojen merkitys tulevaisuudessa tulee olemaan yhä tärkeämpi sen päästöttömyyden takia. Lisäksi sähköautot eivät ole riippuvaisia öljystä, mikä tulee joskus loppumaan. Öljyn vähentyessä fossiilisten polttoaineiden hinnat tulevat nousemaan rajusti. (Lowry & Larminie 2012.)

Akkujen tullessa ensisijaiseksi voimanlähteeksi autoihin, niiden tuotanto kasvaa ja hinnat tulevat alas. Myös niiden tehokkuus ja kapasiteetti kasvavat kovaa vauhtia, lisäten polttomoottoriautoille painetta. Nykyisin suuri este sähköauton ostamiseen on niiden verrattain lyhyt kantama. Pisin kantama on Teslan Model S Long Rangella, jolla pääsee 539 km yhdellä latauksella (kuva 20). Vuonna 2020 julkistettavaan Tesla Roadsteriin väitetään asennettavan 200 kWh akku ja kantamaksi tulisi 1000 km, mikä tarkoittaa varsin kilpailukykyistä matkaa polttomoottoriautoihin verrattuna (Tesla 2019.) Sähköautojen latausinfrastruktuurin täytyy myös kehittyä sähköautojen yleistyessä. Latauspisteitä pitää olla enemmän ja niiden täytyy pystyä lataamaan akkuja nopeammin. Sähköautojen yleistyminen tulee vaikuttamaan sähköverkkoonkin. Ennusteiden mukaan Euroopan sähkönkulutus kasvaisi sähköautojen takia 4-5 % vuoteen 2030 mennessä ja 9,5 % vuoteen 2050 mennessä (Rahman ym. 2018.)



Kuva 20 - Eri sähköautojen ilmoitetut kantamat kilometreinä (EPA 2019).

Muita haasteita tulee olemaan akuissa käytettyjen materiaalien myrkyllisyys ja niiden kierrätyksen haasteellisuus, sekä hiilineutraalin energiantuotannon toteutuminen (Manzetti & Mariasiu 2015). Litiumin saatavuus kasvavalle tarpeelle on myös ongelma. Nopea kasvu sähköautojen kysynnässä voi aiheuttaa pulaa litiumista, mikä johtaisi hintojen nousuun ja sähköautojen kilpailukyvyn heikkenemiseen. Litiumista 74 % sijaitsee Etelä-Amerikassa (kuva 21) ja vahva turvautuminen kyseiseen alueeseen voidaan nähdä geopolittisena riskinä. (Andwari ym. 2017.)



Kuva 21 - Maailman litiumvarantojen osuus (Andwari ym. 2017).

## 8 YHTEENVETO

Sähköautot ovat tekemässä tuloaan tieliikenteeseen, sähköautojen suurimmat ongelmat kohdentuvat niiden lyhyisiin kantamiin ja pitkiin latausaikoihin, sekä korkeisiin ostohintoihin. Tekniikan kehittyessä ja hintojen laskiessa, sähköautot tulevat olemaan kilpailukykyisiä polttomoottoriautojen kanssa ja ilmasto-ongelmien lisääntyessä kiinnostus sähköautoja kohtaan kasvaa.

Moottorin valinnassa sähköautoon on kaikissa vaihtoehtoissa omat hyötynsä ja haittansa. Kestomagneettimoottori on lupaavin ratkaisu ja yleistymässä sähköautokäytössä. Myös akkuratkaisuilla ja niiden jäähdytysjärjestelmillä on keskeinen osa sähköauton tulevaisuuden kannalta. Litium-ioniakut ovat olleet jo pitkään yleisin käytetty akkutyyppi, mutta uusia ratkaisuja kehitetään kovaa vauhtia. Litium-rikkiakkujen käyttö sähköautoissa oletetaan kasvavan tulevaisuudessa. Myös kahden erilaisen akkutyyppin yhdistäminen sähköautoissa tulee arvioiden mukaan olemaan suosittu ratkaisu. Sähköautokäytössä akkujen tärkeimmät ominaisuudet ovat energia- ja tehotiheys, sekä pitkä käyttöikä ja niiden kyky kestää nopeaa latausta. Akkujen jäähdytyksessä nesteellä toimivat järjestelmät ovat yleisimpiä, koska ne pystyvät poistamaan lämpöä tehokkaasti ja niissä käytetty teknologia on ollut jo pitkään käytössä.

## LÄHTEET

**Abada, S.; Marlair, G.; Lecocq, A.; Petit, M.; Sauvart-Moynot, V. & Huet, F. 2016.** *Safety Focused Modeling of Lithium- ion Batteries: A Review*. Journal of Power Sources, Osa 306, ss. 178-192.

**Andawari, A.; Pesiridis, A.; Rajoo, S.; Martinez-Botas, R. & Esfahanian, V. 2017.** *A Review of Battery Electric Vehicle Technology and Readiness Levels*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Osa 78, ss. 414-430.

**Barré, A.; Deguilhem, B.; Gérard, M.; Grolleau, S.; Suard, F. & Riu, D. 2012.** *A Review on Lithium-ion Battery Ageing Mechanisms and Estimations for Automotive Applications*. Journal of Power Sources, Osa 241, ss. 680-689.

**Bizzarri, A. 2018.** *Thermal Management for Batteries in E-Mobility Applications*.

**BMW. 2018.** BMW i3 brochure. Viitattu 8.4.2019. Saatavilla: [https://www.bmw.co.uk/pdfs/brochures/BMW\\_i3\\_Brochure\\_March19.pdf](https://www.bmw.co.uk/pdfs/brochures/BMW_i3_Brochure_March19.pdf)

**Cano, Z.; Banham, D.; Ye, S.; Hintennach, A.; Lu, J.; Fowler, M. & Chen, Z. 2018.** *Batteries and Fuel Cells for Emerging Electric Vehicle Markets*. Nature Energy, Osa 3, ss. 279-289.

**Chau, K.T. 2015.** *Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application*, Osa 1, Wiley

**Chellaswamy, C. & Ramesh, R. 2017.** *Future Renewable Energy Option for Recharging Full Electric Vehicle*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Osa 76, ss. 824-838.

**Chevrolet. 2017.** Chevrolet Bolt EV Specifications. Viitattu 8.4.2019. Saatavilla: <https://media.chevrolet.com/media/us/en/chevrolet/vehicles/bolt-ev/2017.tab1.html#electric>

**Dixon, J.; Nakashima, I.; Arcos, E. & Ortuzar, M. 2010.** *Electric Vehicle Using a Combination of Ultracapacitors and ZEBRA Battery*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Osa 57, ss. 943-949.



**Duong, V.; Bastawrous, H. & See, K. 2017.** *Accurate Approach to the Temperature Effect on State of Charge Estimation in the LiFePO<sub>4</sub> Battery Under Dynamic Load Operation.* Applied Energy, Osa 204, ss. 560-571.

**EuroCar News. 2019.** Viitattu 23.04.2019. Saatavilla: <http://www.eurocarnews.com/20/0/1347/6176/volvo-kinetic-energy-recovery-system-flywheel/gallery-detail.html>

**Fotouhi, A.; Auger, Daniel J. ; Propp, K.; Longo, S. & Wild, M. 2016.** *A review on electric vehicle battery modelling: from lithium-ion toward lithium-sulphur.* Renewable & Sustainable Energy Reviews, Osa 56, ss. 1008-1021.

**Hu, X.; Zou, C.; Zhang, C. & Li, Y. 2017.** *Technology Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management.* IEEE Power and Energy Magazine, Osa 15, ss. 20-31.

**Hunt, I.; Zhao, Y.; Patel, Y. & Offer, J. 2016.** *Surface Cooling Causes Accelerated Degradation Compared to Tab Cooling for Lithium-ion Pouch Cells.* Journal of The Electrochemical Society, Osa 163, ss. 1846-1852.

**Jaguar. 2019.** Jaguar I-PACE Brochure. Viitattu 8.4.2019. Saatavilla: [https://www.jaguar.com/Images/Jaguar-I-PACE-Brochure-1X5902010000BXXEN02P\\_tcm660-650146.pdf](https://www.jaguar.com/Images/Jaguar-I-PACE-Brochure-1X5902010000BXXEN02P_tcm660-650146.pdf)

**Karaaslan, E.; Zhao, Y. & Tatari, O. 2018.** *Comparative Life Cycle Assessment of Sport Utility Vehicles with Different Fuel Options.* The International Journal of Life Cycle Assessment, Osa 23, ss. 333-347.

**Kim, J.; Oh, J. & Lee, H. 2019.** *Review on Battery Thermal Management System for Electric Vehicles.* Applied Thermal Engineering, Osa 149, ss. 192-212.

**Kimura, T.; Saitou, R.; Kubo, K.; Nakatsu, K.; Ishikawa, H. & Sasaki, K. 2014.** *High-Power-Density Inverter Technology for Hybrid and Electric Vehicle Applications.* Hitachi Review, Osa 63.

**Lee, H. & Choi, H. 2017.** *Comparison of Fuel Efficiency and Economical Speed for Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using Backward-Looking Simulation.* Journal of Mechanical Science and Technology, Osa 31, ss. 4499-4509.

**Lowry, J. & Larminie, J. 2012.** *Electric Vehicle Technology Explained*, Osa 2, Wiley

**Lu, L.; Han, X.; Li, J. & Ouyang, M. 2013.** *A Review on the Key Issues for Lithium-ion Battery Management in Electric Vehicles.* Journal of Power Sources, Osa 226, ss. 271-288.

**Manzetti, S. & Mariasiu, F. 2015.** *Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, Osa 51, ss. 1004-1012.

**Nissan 2019.** Nissan LEAF Specs. Viitattu 7.4.2019. Saatavilla <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/compare-specs.html>

**Nykqvist, B. & Nilsson, M. 2015.** *Rapidly Falling Costs of Battery Packs for Electric Vehicles.* Nature Climate Change, Osa 5, ss. 329-332.

**Pesaran, A. 2001.** *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions.*

**Racz, A.; Muntean, I. & Stan, S. 2015.** *A Look into Electric/Hybrid Cars from an Ecological Perspective.* Procedia Technology, Osa 19, ss. 438-443.

**Rahman, A.; Mohammed, A.; Aung, K.; Ismail, A.; AKM, M. & Izan, Sany. 2018.** *Prospect and Challenges of Electric Vehicle Adaptability: An Energy Review Malaysia.* Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, Osa 36, ss. 139-151.

**Raj, A. 2018.** *All You Want to Know About Electric Vehicle Batteries.* Circuit Digest. Viitattu 24.04.2019. Saatavilla: <https://circuitdigest.com/article/all-you-want-to-know-about-electric-vehicle-batteries>

**Rezvanizani, S.; Liu, Z.; Chen, Y. & Lee, J. 2014.** *Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility.* Journal of Power Sources, Osa 254, ss. 110-124

**Schulz, S. E. 2017.** *Exploring the High-Power Inverter: Reviewing critical design elements for electric vehicle applications.* IEEE Electrification Magazine, Osa 5, ss. 28-35.

**Tagliaferri, C.; Evangelista, S.; Acconcia, F.; Domenech, T.; Ekins, P.; Barletta, D. & Lettieri, P. 2016.** *Life Cycle Assessment of Future Electric and Hybrid Vehicles: A*

*Cradle-to-Grave Systems Engineering Approach*. Chemical Engineering Research and Design, Osa 112, ss. 298-309.

**The International Council on Clean Transportation. 2018.** *Effects of Battery Manufacturing on Electric Vehicle Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions*.

**Treiber, M.; Asaithambi, G. & Kanagaraj, V. 2017.** *Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*.

**Tuononen, J. & Lajunen, A. 2016.** *Modal Analysis of Different Drivetrain Configurations in Electric Vehicles*. Journal of Vibration and Control, Osa 24

**Un-Noor, F.; Sanjeevikumar, P.; Mihet-Popa, L. & Mollah, M. 2017.** *A comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Directions of Development*. Energies, Osa 10

**United States Environmental Protection Agency (EPA). 2019.** Fuel Economy.

Viitattu 8.4.2019. Saatavilla:

<https://www.fueleconomy.gov/feg/PowerSearch.do?action=noform&path=1&year1=1984&year2=2019&vtype=Electric>

**Wickramaratne, L. 2017.** *Battery Thermal Management System*.

**Wilberforce, T.; El-Hassan, Z.; Khatib, F.N.; Al Makky, A.; Baroutaji, A.; Carton, J. & Olabi, A. 2017.** *Development of Electric Cars and Fuel Cell Hydrogen Electric Cars*. International Journal of Hydrogen Energy, Osa 42, ss. 25695-25734.

**Xiong, R.; Cao, J.; Yu, Q.; He, H. & Sun, F. 2017.** *Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles*. IEEE Access, Osa 6, ss. 1832-1843.