Ville Perko

Sähköauton akuston korjattavuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

26.5.2021

Tiivistelmä

Tekijä:	Ville Perko
Otsikko:	Sähköauton akuston korjattavuus
Sivumäärä:	47 sivua
Aika:	26.5.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Pasi Kovanen

Työn tavoitteena oli pääasiassa internetistä saatavien tietolähteiden avulla selvittää ja arvioida viiden eri sähköautomallin akuston korjattavuutta. Työssä selvitettiin, millaisia akustot ovat huollettavuuden ja korjattavuuden monimutkaisuuden kannalta.

Korjattavuuden arviointi toteutettiin valitsemalla viisi suosittua eri akkukennotyypeillä varustettua sähköautomallia ja perehtymällä niiden akustojen rakenteisiin ja purettavuuteen. Työn alussa myös esitellään teoriaa sähköautojen yleisimmistä akkukennotyypeistä ja akkukemioista sekä akustojen rakenteesta.

Lähteitä käyttäen käsitellyistä ajoneuvoista koostettiin akuston purkuselostukset, joiden avulla arvioitiin akustoja huollettavuuden ja korjattavuuden näkökulmasta. Purkuselostus aloitetaan jokaisessa ajoneuvomallissa akuston irrotustyöstä ja tämän jälkeen selostetaan akuston avaus- ja purkutyö niin pitkälle kuin akustoa on kannattavaa purkaa korjaustoimenpiteitä ajatellen.

Purkuselostuksen laatimisen jälkeen jokaisesta automallista tehtiin yhteenveto, jossa arvioitiin työn eri vaiheiden haastavuutta käsiteltävän ajoneuvon osalta ja tehtiin johtopäätökset käsiteltävän ajoneuvon korjattavuudesta. Vaihtokomponenttien saatavuutta arvioitiin etsimällä tarkasteltavien ajoneuvojen akustoihin käytettyjä purkukomponentteja uusien osien vaihtoehtoina ja arvioimalla osien todellista saatavuutta. Lopuksi verrattiin eri ajoneuvoista saatuja johtopäätöksiä ja tietoja keskenään sekä arvioitiin käsiteltyjen automallien akuston korjaustyön haastavuutta polttomoottoriautoon verrattuna.

Sähköautojen akustojen todettiin olevan pääsääntöisesti melko yksinkertaisia huoltaa ja korjata. Jotta huoltotoimenpiteitä päästään suorittamaan, on akustot kuitenkin irrotettava ajoneuvosta. Akuston irrotustyö ei missään automallissa ollut haastavaa, ja akuston pystyi irrottamaan korkeintaan tunnissa. Akuston moduulin vaihtotyö arvioitiin kustannustehokkaimmaksi tavaksi vaihtaa vioittuneita kennoja, koska yksittäiset kennot ovat sinetöitynä moduulissa.

Avainsanat: sähköauto, akusto, korjaaminen

Abstract

Author:	Ville Perko
Title:	Repairability of Electric Vehicle Batteries
Number of Pages:	47 pages
Date:	26 May 2021
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Automotive Engineering
Professional Major:	Automotive Electronics Engineering
Supervisors:	Pasi Kovanen, Senior Lecturer

The objective of this Bachelor's thesis was to study and evaluate the repairability of electric car batteries by utilizing source material acquired mainly from the Internet. The electric car batteries were studied from the perspective of their complexity to service and repair.

The evaluation of the reparability was conducted by reverse engineering the design and deconstructability of battery packs from five different currently popular electric car models. Theory of most common battery types and chemistries is explained at the beginning of the thesis as well the basic construction of a battery pack.

Descriptions of the deconstruction process were created by using the source material for the five vehicles. The descriptions begin from the battery removal and they continue as far the battery packs can be dismantled step by step, until it is not viable to dismantle them any further.

After the description, a summary which includes evaluation of the difficulty of repairs and overall repairability of such battery, was made for every car model. Availability of replacement components was evaluated by studying the salvage parts market in oppose to new components. In the end of the thesis, an overall conclusion was conducted as a comparison of the discoveries made from the five car models. The difficulty of the repair work was also compared to a vehicle with an internal combustion engine.

Overall, the electric vehicle batteries were found out to be rather uncomplicated to service and repair. Although the battery pack needs to be removed from the vehicle for almost any kind of service task, the process of removing the pack is not a difficult task in any model. The removal of the battery pack took approximately one hour at its longest. The most cost-efficient way of repairing faulty battery cells was found out to be battery module replacement, while the cells are usually sealed in the battery module.

Keywords: Electric car, Battery pack, Repair

Sisällys

1 Johdanto 1

2 Sähköauton akuston kennot 2

2.1 Akkukennotyypit 2
2.1.1 Sylinterikenno (Cylindrical Cell) 2
2.1.2 Prismaattinen kenno (Prismatic Cell) 3
2.1.3 Pussikenno (Pouch Cell) 4
2.2 Akkukemiatyypit 4
2.2.1 LMO (litium-mangaanioksidi, LiMn2O4) 5
2.2.2 NMC (litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi, LiNiMnCoO2) 5
2.2.3 NCA (litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, LiNiCoAlO2) 6

3 Sähköauton akuston rakenne 7

3.1 Moduulit 8
3.2 Runkokehikko 8
3.3 Akun- ja virranhallintajärjestelmä (Battery Management System) 9
3.4 Lämmönhallintajärjestelmä 9

4 Eri sähköautomallien akustot 10

4.1 Käsiteltävät ajoneuvomallit 10
4.2 Tesla Model S 85 Pre-facelift 2012-2016 11
4.2.1 Akuston rakenne 11
4.2.2 Akuston purettavuus 13
4.2.3 Yhteenveto 14
4.3 Tesla Model 3 15
4.3.1 Akuston rakenne 16
4.3.2 Akuston purettavuus 18
4.3.3 Yhteenveto 20
4.4 Nissan Leaf 24 kWh ZE0 2010–2012 21
4.4.1 Akuston rakenne 22
4.4.2 Akuston purettavuus 24
4.4.3 Yhteenveto 26
4.5 Renault Zoe 41 kWh ZE40 27
4.5.1 Akuston rakenne 28

4.5.2 Akuston purettavuus 29
4.5.3 Yhteenveto 30
4.6 BMW i3 60 Ah 31
4.6.1 Akuston rakenne 33
4.6.2 Akuston purettavuus 34
4.6.3 Yhteenveto 37

5 Yhteenveto ja johtopäätökset 38

Lähteet 41

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää eri sähköautomallien akustojen korjausmahdollisuuksia. Tällä hetkellä monet suomalaisten omistamat sähköautot ovat vielä takuunalaisia, jolloin akuston vikaantuessa syystä tai toisesta on valmistajilla melko yleisenä tapana vaihdattaa koko akusto uuteen, vanhan mennessä valmistajan toimesta yleensä kunnostettavaksi. Takuun ulkopuolelle jäävissä tilanteissa se ei kuitenkaan ole kuluttajalle kustannustehokkain tapa, sillä kokonainen uusi akkupaketti on erittäin kallis hankinta. Ensimmäiset Tesla Model S:t ja Nissan Leafit alkavat olemaan jo takuunsa päässä, jolloin vastuu akuston kunnon ylläpidosta ja kuluista siirtyy kuluttajalle.

Kuluttajalla saattaakin herätä kysymyksiä: Voinko korjata sähköautoni akuston vaihtamatta sitä kokonaan? Onko jokin sähköauto helpompi tai halvempi korjata kuin toinen? Onko sähköautojen korjaamiselle olemassa kolmansien osapuolien jälkimarkkinoita?

Opinnäytetyöhön valittiin otos tällä hetkellä suosittuja sähköautomalleja, joiden akustojen rakenteeseen perehdyttiin purku- ja korjausmahdollisuuksien kannalta ja verrattiin eri suunnitteluratkaisuja korjauksen haastavuuteen ja kustannuksiin perustuen. Aihe on vielä suhteellisen tuntematon Suomessa, sillä korjaukset ovat pääasiallisesti suoritettu takuuaikana valmistajan omien ohjeistusten mukaisesti eikä asiaan ole ollut tarvetta perehtyä enempää. Tietolähteenä käytetään pääasiallisesti internetistä saatavilla olevaa informaatiota, sillä kirjallisuuslähteitä ei vielä ole saatavilla.

2 Sähköauton akuston kennot

2.1 Akkukennotyypit

Sähköautovalmistajat ovat löytäneet monia eri tapoja, miten akusto on pakkausteknisesti järkevin valmistaa. Sähköautoissa käytetään pääasiallisesti kolmea eri muotoista akkukennotyyppiä, jotka vaikuttavat esimerkiksi energiatiheyteen, termodynaamisiin ominaisuuksiin ja tilankäyttöön akkupaketin suunnittelun kannalta. Tällä hetkellä sähköautoissa käytössä olevia akkukennotyyppejä ovat sylinteri, prismaattinen ja pussi. (1)

2.1.1 Sylinterikenno (Cylindrical Cell)

Sylinterin muotoinen litiumionikenno (kuva 1) on vuosien kehityksen tuloksena saatu valmistuskustannuksiltaan alhaiseksi, ja se on rakenteellisesti kestävä. Se koostuu sylinterimäisestä metallikuoresta, jonka sisälle on rullattu anodi- ja katodinauhat, joiden välissä on huokoinen eristemuovi imeytettynä elektrolyyttiliuoksella. Usein käytetään esimerkiksi akkukäyttöisissä työkaluissa, kannettavien tietokoneiden akuissa sekä myös tavanomaisen pariston korvaajana. Suosittu ja paljon irrallisina kennoina käytetty sylinterikennomalli on 18650, joka nimensä mukaisesti on 18 mm halkaisijaltaan ja 65 mm korkeudeltaan. Muita käytössä olevia kennomalleja ovat esimerkiksi 21700 ja 26650. (1)

Kuva 1. Sylinterikenno, pienelektroniikasta monelle tuttu akkukennotyyppi (2, s. 2).

Sylinterikennossa on hyvä purku- ja lataussyklin kestävyys, ja ovat pääsääntöisesti pitkäikäisiä. Pakkausteknisesti kuitenkaan kenno ei ole muotonsa vuoksi tehokkain, sillä se jättää kennojen väliin tyhjää tilaa. Jäävää tilaa voi toisaalta hyödyntää jäähdytysratkaisujen suunnittelussa. Myös yksittäisen kennon korkea energiatiheys kompensoi heikompaa pakattavuutta. (1)

2.1.2 Prismaattinen kenno (Prismatic Cell)

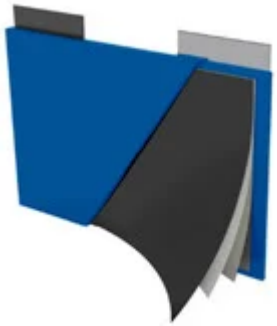
Prismaattinen kenno on yleensä suorakulmaisen särmiön muotoinen kenno (kuva 2), jossa anodit ja katodit ovat joko kerrostettuina arkkeina päällekkäin tai yhtenäisenä käärittynä nauhana. Anodin ja katodin välissä on elektrolyyttiliukoseen imeytetty eristemuovi. Anodi- ja katodinauha on sijoitettu yleensä suorakulmaisen särmiön muotoiseen kotelointiin, joka pienemmässä koossa voi olla valmistettu muovista ja yleensä suurempikokoisena metallista. Mitään prismaattisten kennojen standardikokoja ei juurikaan ole, vaan valmistajat yleensä tekevät kennojen mitoitusratkaisut omien tarpeidensa mukaan. (1)

Kuva 2. Prismaattinen kenno, joka voi olla muovi- tai metallikoteloitu (2, s. 2).

Prismaattinen kenno on rakenteeltaan helpompi pakata ja suunnitella tiettyyn käyttötarkoitukseen kuin esimerkiksi sylinterikenno. Kennojen mahdollinen lievä muodonmuutos lataus- ja purkusyklissä tulee huomioida akustosuunnittelussa prismaattisia kennoja käytettäessä. (1)

2.1.3 Pussikenno (Pouch Cell)

Pussikennot (kuva 3) ovat rakenteeltaan lähellä prismaattista kennoa, mutta kovan koteloinnin sijaan kenno on päällystetty ohuella metallifoliolla ja on täten pakkausteknisesti tehokkain vaihtoehto. Kennot ovat ohuen rakenteensa vuoksi kuitenkin herkkiä teräville osumille, ja käyttökohteissa tuleekin tarkemmin ottaa huomioon kennojen oikea sijoittelu, suojaus ja tila laajenemiselle. Pussikennot eivät ole kooltaan standardoituja ja ovat valmistajien vapaasti mitoitettavissa käyttötarpeen mukaan. Pussikennot laajenevat lataus- ja purkusykleissä. Pussikennoja käytettäessä on otettava erityisesti huomioon pussikennojen suojakoteloinnin suunnittelu ja kennojen tarvitsema kompressio. (1)



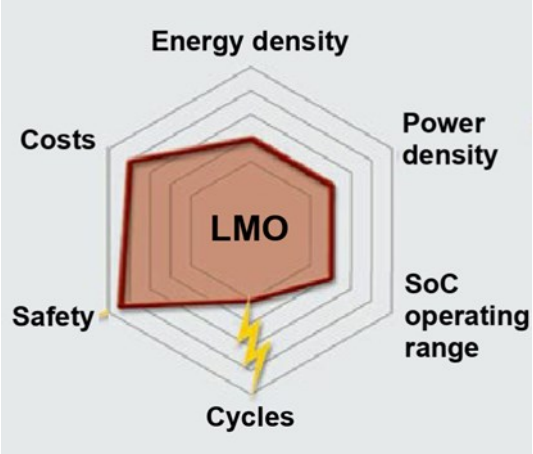
Kuva 3. Pussikenno, joka on pakkausteknisesti tehokas, mutta heikon ulkokuorensa takia vaatii hyvin suunnitellun koteloinnin ympärilleen (2, s. 2).

2.2 Akkukemiatyypit

Litiumioniakuissa voidaan käyttää anodina, katodina ja elektrolyyttinä eri yhdisteitä, jotka vaikuttavat kennon eri ominaisuuksiin. Eri sähköautovalmistajat valitsevat akkukemian sen perusteella, mitä ominaisuuksia ne haluavat akuissaan korostaa. Sähköautoissa käytetyt kolme tyypillisintä akkukemiaa ovat NMC, LMO sekä NCA, joista LMO ei enää nykyään ole juurikaan käytössä. (4)

2.2.1 LMO (litium-mangaanioksidi, LiMn2O4)

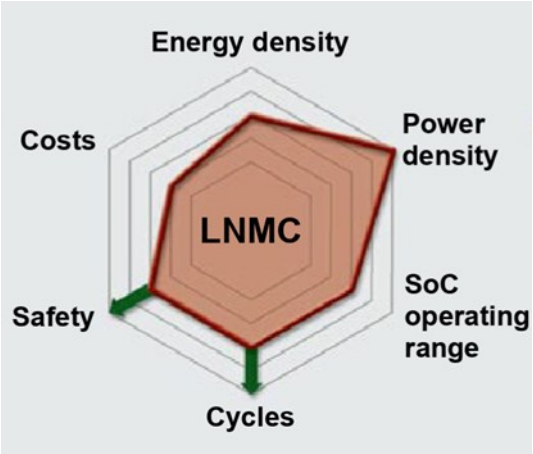
LMO-kennon katodi on valmistettu mangaanikiderakenteesta ja anodi on grafiittia. Kuvassa 4 nähdään, että mangaanioksidin etuna ovat verrattain alhaiset materiaalikustannukset ja hyvä stabiliteetti. Mangaanikidepohjaisen kemian haittapuolina kuitenkin ovat verrattain heikohko lataussyklikesto, heikko säilytyksenkestävyys ja melko alhainen kapasiteetti. Näiden ominaisuuksien vuoksi sähköautovalmistajat ovat nykyään siirtyneet muihin akkukemioihin. (3; 4, s.106–107; 5, s. 380.)



Kuva 4. LMO-kemian ominaisuuksien vertailukartta (5, s. 380).

2.2.2 NMC (litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi, LiNiMnCoO2)

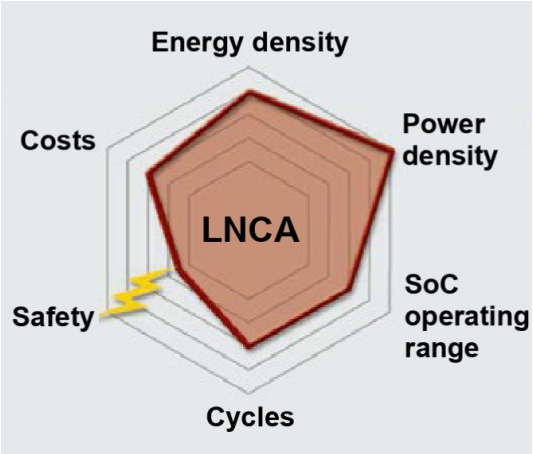
NMC-kennon katodi on valmistettu nikkeli-kobolttioksidin, mangaani-kobolttioksidin kiderakennekerroksista. Anodi on grafiittia, johon voidaan käyttötarpeen mukaan lisätä piitä ominaisuuksia muuttamaan. Mangaanin ja koboltin suhdetta vaihtamalla voidaan lisätä joko energiatiheyttä tai tehontuottoa. Tällä hetkellä NMC on suosituin kemia sähköautovalmistajien keskuudessa monikäyttöisyytensä ansiosta. Kuvassa 5 havainnollistettu hyvä energiatiheys, lataussyklikestävyys ja kyky luovuttaa virtaa tehokkaasti tekevät kemiasta hyvin soveltuvan sähköajoneuvokäyttöön. (3; 4, s. 107–112; 5, s. 380.)



Kuva 5. NMC-kemian ominaisuuksien vertailukartta (5, s. 380).

2.2.3 NCA (litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, LiNiCoAlO2)

NCA-kennon kemialliset ominaisuudet ja rakenne ovat samankaltaiset kuin NMC:llä, mutta mangaani on korvattu alumiinilla. Esimerkiksi Tesla käyttää yksinomaan tätä akkukemiaa sähköautoissaan toisten valmistajien käyttäessä muita kemioita. Kuten kuvassa 6 esitetään, energiatiheys ja suorituskyky ovat hyviä, mutta kenno on muihin verrattuna kalliimpi valmistaa, lievästi heikompi lataussyklikestoltaan ja epävakaampi turvallisuuden näkökulmasta. (3; 4, s. 112–113; 5, s. 380.)

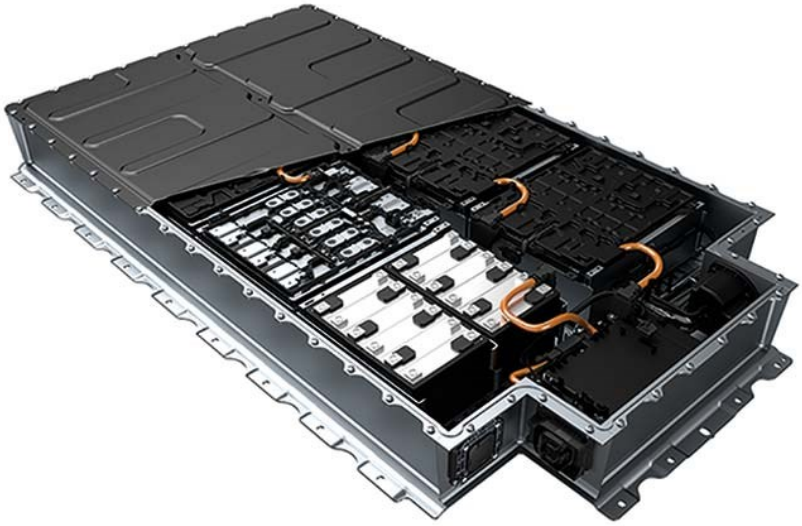


Kuva 6. NCA-kemian ominaisuuksien vertailukartta (5, s. 380).

3 Sähköauton akuston rakenne

Sähköauton akusto koostuu pääasiallisesti akkukennoista, jotka on sijoitettu moduuleihin. Moduulit on asennettu runkokehikkoon, johon on usein sijoitettu myös akunhallintajärjestelmä BMS ja lämmönhallintajärjestelmä. (6; 7; 8)

Kennot on useimmiten jaettu kennoryhmiin eli moduuleihin. Moduulit on sijoitettu runkokehikkoon. Runkokehikko on yleensä alumiinista valmistettu kehikko, joka on suojattu vesitiiviisti peltikuorella. Kennot on yhdistetty toisiinsa joko hitsatuilla tai pultatuilla johtimilla. Moduulien toimintaa ohjataan akunhallintajärjestelmällä ja releillä. Akustossa on pääsulake, joka laukeaa oikosulkutilanteessa. Kennoissa ja/tai moduuleissa on anturit, joilla mitataan jännitettä, virtaa ja lämpötilaa. Osa akku- sekä autovalmistajista on kennojen energiatehokkuuden ja lämmönhallinnan optimoimiseksi toteuttanut nestekiertojärjestelmät akustoihin. Nestekiertojärjestelmässä akkukennojen tuottama lämpöenergia siirretään ulkoilmaan jäähdytinkennon avulla. (6; 7; 8) Kuvassa 7 on esimerkki tyypillisestä akkupaketista komponentteineen.



Kuva 7. BMW i3:n akkupaketti. Suojakannen alla näkyvissä runkokehikko, moduulit, kennot, akunhallintajärjestelmä ja johtimet. (9)

3.1 Moduulit

Akustot koostuvat useimmiten monista yksittäisistä akkukennoista, jotka on jaettu pienempiin kennoryhmiin, moduuleihin. Kennot sijoitetaan moduuleihin helpottamaan valmistus- ja kokoonpanoprosessia sekä suojaamaan muuten herkkiä kennoja ulkoisilta iskuilta, lämmöltä ja tärinältä. Kennot ovat moduuleissa kytkettyinä sarjaan ja/tai rinnan, jotta haluttu moduulin kokonaisjännitetaso ja kapasiteetti saavutetaan. Kennot on kytketty toisiinsa eri tavoilla valmistajasta ja suunnittelulähtökohdasta riippuen, esimerkiksi pulttaamalla tai hitsaamalla. Moduulit sisältävät myös usein vaimennus- ja eristysmateriaaleja, joilla pyritään suojaamaan kennoja iskuilta, värinältä ja lämpötilavaihteluilta sekä parantamaan paloturvallisuutta. (6) Kuvassa 8 on esimerkki akkumoduulista, jossa käytetään pussikennoja.

Kuva 8. Irrallinen Renault Zoen akkumoduuli, joka sisältää 16 kennoa.

3.2 Runkokehikko

Runkokehikko voi olla joko yksi kokonainen kaikki moduulit sekä akustonhallintakomponentit yhteen pakettiin sitova kokonaisuus tai kehikoita voi olla akkusijoittelusyistä useampia. Runkokehikkoon akkumoduulit kiinnitetään laajemmaksi kokonaisuudeksi, joka voidaan helpommin irrottaa ajoneuvosta. Runkokehikko voi olla osana ajoneuvon kantavaa rakennetta sekä turvarakennetta. Kehikko

on pääasiassa metallia, esimerkiksi terästä tai alumiinia. Kehikko on suojattu ulkoisilta elementeiltä suojakuorella, joka tyypillisesti on alumiinipeltiä ja joko pultattu sekä tiivistetty o-renkaalla, liimattu tai pultattu ja liimattu kiinni. Haasteina on eri valmistajien valitsemat tiivistysmenetelmät, jotka tiivisteliimauksen yhteydessä on toteutettu niin vahvoilla liimauksilla, että suojakotelon avaaminen vaurioittamatta kotelointia voi osoittautua haastavaksi. (6)

3.3 Akun- ja virranhallintajärjestelmä (Battery Management System)

Akun- ja virranhallintajärjestelmän tarkoituksena on maksimoida akuston turvallisuus ja elinikä sekä kertoa akuston sen hetkisen toiminnan tilan, varauksen ja arvioida kokonaiskapasiteettia. Se ilmoittaa akuston vikatiloista, toteuttaa kennoston huoltotoimenpiteitä mahdollisuuksien mukaan sekä varmistaa, ettei akustoa käytetä liian alhaiseen varaustilaan ja kommunikoi latausjärjestelmien kanssa oikean latausjännitteen ja virran varmistamiseksi ja ylilatauksen ehkäisemiseksi. Vikatilan tapahtuessa, BMS päättää akuston virran katkaisusta. (7)

3.4 Lämmönhallintajärjestelmä

Lämmönhallintajärjestelmän tavoitteena on pitää akuston sisäinen lämpötila mahdollisimman optimaalisena akustoon kohdistuessa kuormitusta sekä korkeita tai matalia ulkolämpötiloja. Järjestelmän voi pääasiassa toteuttaa joko nestekierrolla tai ilmakierrolla. (8)

Ilmakierto on vaihtoehdoista yksinkertaisempi tapa. Akuston koteloinnin sekä moduulien väliin on jätetty riittävä ilmatila, jolloin kennojen tuottama lämpöenergia siirtyy ilmaan konvektion avulla. Joissain ilmakiertoisissa akustoissa on aktiivinen ilmankiertojärjestelmä, esimerkiksi ilmastoinnin kennon lävitse viileää ilmaa akustolle tuova puhallusjärjestelmä. Täysin passiivisessa ilmakierrossa on haasteena kuumissa olosuhteissa akuston riittävä lämmönhaihdutuskyky. (8)

Nestekiertoinen järjestelmä toteutetaan pääasiallisesti kierrättämällä jäähdytysnestettä sähköisen pumpun avulla akustoon sijoitettujen nestekanavien ja autoon sijoitetun jäähdytyskennon kautta. Nestekiertoisia järjestelmiä toteutetaan

myös kylmäaineilla ilmastointijärjestelmän tapaan, jossa akuston tuottama lämpöenergia siirretään pois kennoilta sijoittamalla höyrystin akustoon ja lauhdutin ulkoilmaan. (8)

Lämpötilatavoitteena on pitää akusto noin 20–40 celsiusasteessa sisäisen akuston lämpötilaeron ollessa maksimissaan 5 celsiusastetta. Kylmissä olosuhteissa akusto pitäisi saada lämmitettyä optimikäyttölämpötilaan mahdollisimman tehokkaasti. (8)

4 Eri sähköautomallien akustot

4.1 Käsiteltävät ajoneuvomallit

Sähköautoja on markkinoilla monilta eri valmistajilta ja useita eri malleja. Otantaan on valittu automalleja, joiden akustot edustavat useampaa erityyppistä suunnitteluteknistä lähtökohtaa, jotka mahdollisesti luovat eroavaisuuksia korjattavuudessa. Ajoneuvomalleista tarkastellaan akuston rakennetta sekä akuston purettavuutta selostaen akuston irrotus- ja avausprosessia. Lopuksi jokaisesta ajoneuvomallista tehdään yhteenveto, jossa arvioidaan kunkin akuston korjattavuutta.

Ajoneuvot olivat

- Tesla Model S
- Tesla Model 3
- Nissan Leaf
- Renault Zoe
- BMW i3.

4.2 Tesla Model S 85 Pre-facelift 2012-2016

Tesla Model S (kuvassa 9) oli ensimmäinen sähköauto, joka onnistui lupauksessaan toimittaa asiakkaille pidemmän ajomatkan sekä helpomman latauksen premium-autoluokassa. (10)

Kuva 9. Pre-facelift Tesla Model S (11).

4.2.1 Akuston rakenne

Tesla käyttää kuvassa 10 esiintyvässä Model S 85:n 85 kWh:n akkupaketissa 16 kpl:ta 74P6S-konfiguraation moduuleja, joista jokainen sisältää 444 kpl sylinterimallisia 18650 NCA

-kennoja. Yhden moduulin nimellisjännitetaso on 22,8 V. Akuston nimellisjännite on 364,8 V. Model S:n akusto on sijoitettu auton pohjaan. (12)

Kuva 10. Model S:n 85 kWh:n akkupaketti irrallisena (13).

Runkokehikko on valmistettu alumiinista ja toimii kiinnitysalustana moduuleille, nestekiertojärjestelmälle, akunhallintayksikölle sekä kontaktoreille. Se toimii autoon kiinnitettynä osana turvarakennetta ja jäykistää koria. Moduulit sijoittuvat kehikkoon kahteen seitsemän moduulin riviin, jonka lisäksi kehikon etuosaan sijoittuu kaksi moduulia päällekkäin. Akusto on nestejäähdytetty, ja jokaiseen moduuliin kulkee nestelinja sisään ja ulos. Akuston päällä on pikaliitokset jäähdytysnestelinjoille, jotka yhdistävät järjestelmän auton puolella olevaan nestekiertoon. Kehikon päällä on ohut suojakansi, joka on kiinnitetty kehikkoon pultein ja tiivisteliimalla. Palonkestävä kansi on peitetty suojamuovilla, joka suojaa akustoa kosteudelta. (13; 14)

Jokaisessa moduulissa on kaksi lämpöanturia ja monitorointipiiri, jotka on johtosarjalla liitetty akkupaketin BMS:ään. Moduulit on yhdistetty toisiinsa tinapinnoitetusta kuparista valmistetuilla johdinterminaaleilla, jotka samalla toimivat moduulien kiinnityksenä kehikossa. (13; 15)

Kennot ovat asetettu moduuliin kuuteen riviin, joissa jokaisessa rivissä on 74 kappaletta kennoja. Kennot ovat toistensa vieressä pystyasennossa ja kennojen välissä kulkee jäähdytyskanava kiertäen jokaisen kennorivin välistä. Kennot ovat sivuistaan irrallisia, mutta ovat kiinnitettyinä päädyistään moduuliin

muovisen kannen ja johdinlevyjen avulla. Kennon päällä on ensimmäisenä muovinen kansi, jossa on jokaiselle kennolle pyöreä syvennys, joka pitää yksittäisen kennon oikeassa asennossa. Jokaisen kennon navan kohdalla muovissa on aukko, jotta muovin päälle sijoitettava johdinlevy voi yhdistyä kennoon kennoihin hitsattujen metallijohdinten avulla. Ohuet metallijohtimet toimivat samalla yksittäisen kennon sulakkeena. Muovikuori ja metallikansi on vahvasti liimattu kennoihin ja tekevät komponenttien purkamisen ehjänä ilman erikoisvälineitä hyvin haastavaa. (14; 15; 16)

4.2.2 Akuston purettavuus

Runkokehikko on kiinnitetty muuhun autoon pulttikiinnityksellä ja on irrotettavissa tukemalla akustoa alapuolelta ja avaamalla kiinnityspultit laskien tämän jälkeen akuston suoraan alaspäin autosta, kuten kuvassa 11 esitetään. Sähkökontaktit irtoavat samalla, kun akku erotetaan autosta eikä akustosta lähde erikseen irrotettavia johtosarjoja. Nestelinjat on toteutettu pikaliittimillä, jotka sulkeutuvat automaattisesti akuston erottuessa ajoneuvosta. Kehikon suojapelti on haasteellinen irrottaa ehjänä tiivisteliimauksen vahvuuden vuoksi. (13; 17)

Kuva 11. Model S:n akuston erotus ajoneuvosta pilarinostimen ja saksinostimen avulla kuormalavalle helpompaa liikuttelua varten (17).

Ennen moduulien irrotusta tulee akuston nestelinjat tyhjentää kuivaksi jäähdytysnesteestä. Moduulit ovat kiinnitetty suoraan johdinterminaaleista pulteilla kehikkoon ja ovat irrotettavissa pultit avaamalla. Moduulien anturoinnin johtosarjan liittimet tulee irrottaa ennen moduulien kehikosta poistoa. Kuten kuvassa 12 moduulit voi nostaa kehikosta käsin. (13)

Moduulien purkaminen ei ole kannattavaa niiden sinetöidyn rakenteen vuoksi (16).

Kuva 12. Model S:n akkumoduulit pystyy nostamaan käsin akkukehikosta jäähdytysnesteen tyhjennyksen, antureiden johtosarjan sekä johdinterminaalien irrotuksen jälkeen (13).

4.2.3 Yhteenveto

Tesla Model S:n akkupaketti on suhteellisen nopeasti irrotettavissa autosta sopivalla nostolaitteistolla. Akkupaketti on mahdollista avata ja akkumoduulit ovat vaihdettavissa kohtalaisella työllä. Kotelointi vaatii kokoamisvaiheessa uuden suojakannen ja muovikalvon akkukehikon päälle, jos ne ovat rikkoutuneet avausvaiheessa. Kirjoitushetkellä ei löytynyt tapoja, miten yksityishenkilö voisi hankkia uusia Teslan alkuperäisosia akustoa varten.

Yksi Tesla Model S 85:n akkumoduuli Euroopan markkinoilla maksaa käytettynä n. 1150 €, joka on jo melko kohtuullinen hinta verrattuna kokonaiseen akkupakettiin. Käytetyissä moduuleissa on aina piilevä riski mahdollisesta moduulin viallisuudesta. Käytetty moduuli kannattaakin hankkia vain luotettavalta taholta, joka on asianmukaisesti kuntotarkastanut moduulin ja voi antaa tuotteelle toimintatakuun. (18)

Moduulista ei ole kannattavaa vaihtaa yksittäisiä kennoja niiden suuren lukumäärän ja moduulin sinetöidyn rakenteen vuoksi. Tesla Model S -mallien eri kapasiteetin akustot ovat rakenteeltaan pitkälti samankaltaisia, vaikka kennojen ja moduulien lukumäärä lievästi vaihtelee, ja täten edellä käsiteltyä informaatiota pystyy soveltamaan muihin Model S -malleihin. Akkumoduulin yhteensopivuus kyseiseen kapasiteettiversioon ja vuosimalliin on syytä kuitenkin selvittää aina ennen moduulin hankintaa, koska eri kapasiteettiversioiden sekä vuosimallien moduuleissa olevien kennojen lukumäärässä ja/tai moduulien määrässä voi olla eroja. (14)

4.3 Tesla Model 3

Tesla Model 3 (kuvassa 13) on Teslan neljäs tuotantoon saatettu automalli ja ollut tuotannossa vuodesta 2017 lähtien. Model 3 on kooltaan Model S:ää ja Model X:ää pienempi ja hinnaltaan verrattain huomattavasti halvempi.

Alhaisemman hinnan ansiosta se on monelle kuluttajalle helpommin hankittavissa. Model 3:sta tulikin vuonna 2020 maailman myydyin sähköautomalli. (19; 20)

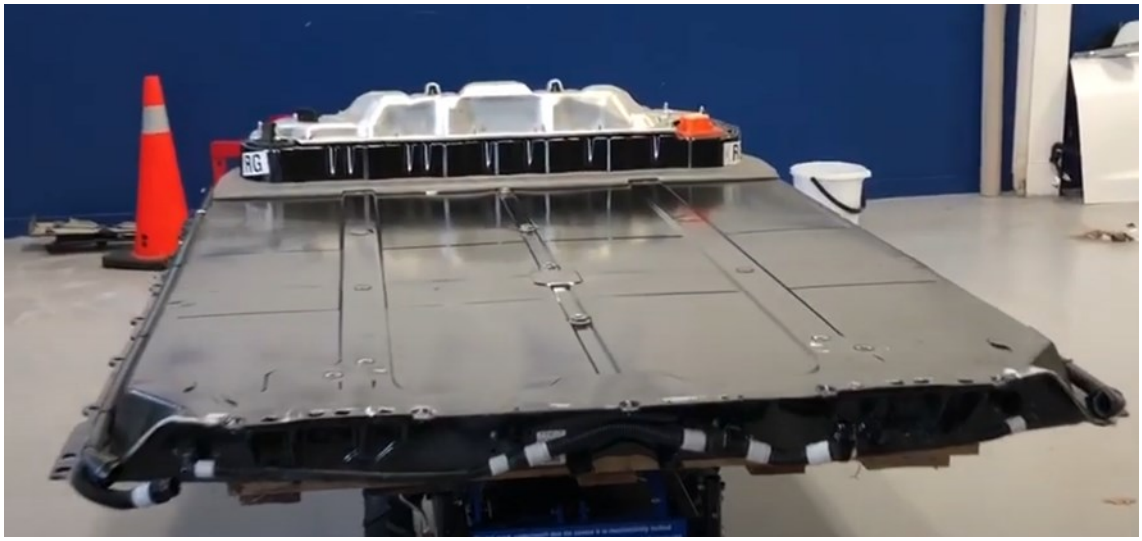
Kuva 13. Tesla Model 3 (21).

4.3.1 Akuston rakenne

Model 3 käyttää 80 kWh:n akkupaketissaan Teslan ja Panasonicin yhteiskehittämiä sylinterimallisia 2170 NCA -kennoja. Kennoja on akustossa yhteensä 4416 kpl. Moduulien koko on huomattavan suuri ja niiden lukumäärä akkupaketissa on 4. Moduulin sisällä kennot on jaettu ryhmiin. Yhdessä ryhmässä on 46 sylinterikennoa. Moduuleja on kahta eri kokoa, joista kaksi pienempää sisältää 23 kennoryhmää ja kaksi suurempaa 25 kennoryhmää. (22)

Akusto on nestejäähdytetty, ja jokaisen moduulin kautta kiertää jäähdytysneste. Neste ei ole pelkästään kierrossa akuston sisäisesti, vaan se kiertää akuston lisäksi myös venttiiliohjauksen avulla voimansiirron ja virranhallintajärjestelmän kautta. Jäähdytysneste jäähdytetään tarvittaessa ilmastointijärjestelmään kytketyn lämmönvaihtimen avulla. (23)

Akkukehikko on valmistettu alumiinista ja toimii kiinnitysalustana moduuleille, nestekiertojärjestelmälle, akunhallintayksikölle sekä kontaktoreille. Kehikko on autoon kiinnitettynä osana korin turvarakennetta ja jäykistämässä koria. Kuvassa 14 nähdään kehikon päällä oleva peltinen suoja, joka on kiinnitetty pulteilla ja tiivisteliimalla. Kontaktorit, releet, DC-DC-muunnin, latausyksikkö ja moduulikohtaiset akunhallintayksiköt sijaitsevat akuston takaosassa, ”penthousessa” erillisen peltikannen alla, ja niihin pääsee myös käsiksi irrottamatta akustoa autosta ajoneuvon sisältä. (24; 25)



Kuva 14. Tesla Model 3:sta irrotettu akkupaketti. Paketin takaosassa näkyvissä Teslan ”penthouse,” joka sisältää akuston tarvitsemat hallintakomponentit. (26)

Moduulit ovat kehikossa pitkittäin (kuva 15). Moduuleista kaksi vasenta on kytkettynä keskenään sarjaan ja kaksi oikeaa on kytkettynä keskenään sarjaan. Kahden sarjaan kytketyn moduulin yhteisjännite on noin 175 V täyteen ladattuina. Ulommissa moduuleissa on takaosassa päällä plusnavat ja sisemmissä moduuleissa miinusnavat, jotka yhdistyvät toisiinsa pyroteknisen erottimen kautta, jonka takana yhteisjännite moduuleille on noin 350 V. Jokaisessa moduulissa on akunhallintayksikkö, jotka ovat sillattuna toisiinsa parikaapelilla väyläohjausta varten. (24; 25)

Kuva 15. Model 3:n akkukehikko kansi avattuna moduulien ollessa paikallaan. Alaosan päältä irrotettu ”penthouse” komponentteineen jotta moduulit saa kokonaisuudessaan näkyville. (25)

Moduulit ovat täysin sinetöityjä yksiköitä. Moduuli on sivuistaan ja pohjastaan muovikoteloitu ja päällä on muovikansi. Kennojen ja kannen sekä pohjan välissä on joustava lämpöä johtava massa. Kennojen väliin jäävät tyhjät tilat on täytetty kovettuvalla vahvalla epoksityyppisellä aineella sekä lämpöä johtavalla massalla, joiden poistaminen vaatii hyvin paljon manuaalista työtä ja aikaa. (24; 25; 27)

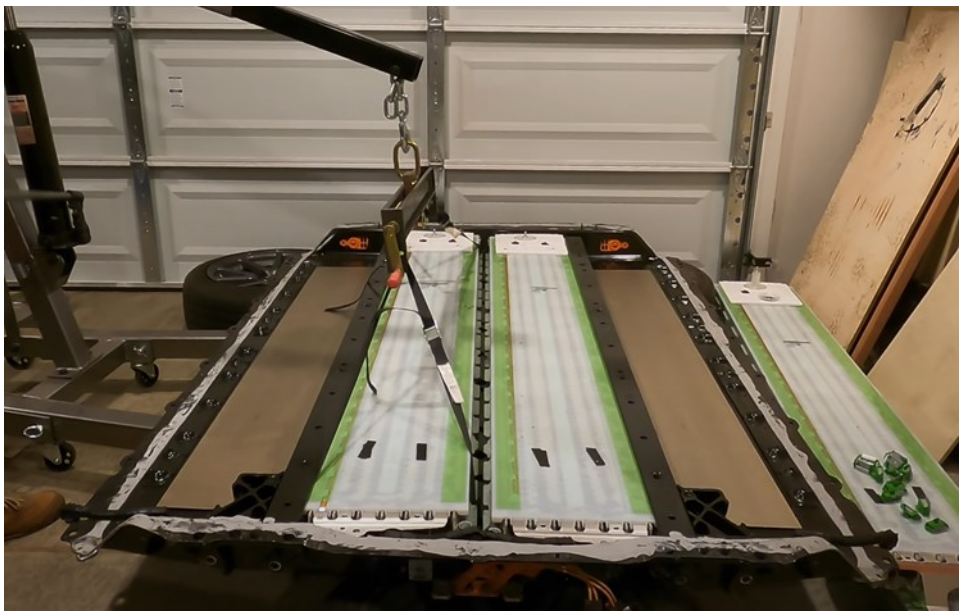
4.3.2 Akuston purettavuus

Model 3:n akkukehikko on sijoitettu auton pohjaan ja se on kiinnitetty auton koriin pulteilla auton alapuolelta sekä yläpuolelta, auton sisältä. Jotta yläpuolisiin kiinnityspultteihin pääsee käsiksi, on auton sisustasta purettava takaistuin, etuistuimet, keskikonsoli sekä lattiaverhoilu. Osa yläpuolisista kiinnityspulteista on Teslan omalla erikoiskannalla vaatien erikoistyökalun niiden avaamiseen. Pohjassa on runsaasti suojamuoveja, jotka pitää irrottaa, jotta alapuolen pultteihin pääsee käsiksi. Ennen akuston irrotusta tulee järjestelmä tyhjentää jäähdytysnesteestä. Akkupaketin molemmissa päissä on jokaiselle neljälle moduulille jäähdytysnestelinjat, joissa on pikaliittimet linjojen katkaisua varten.

Sähköliittimet irrotetaan auton sisältä yläpuolelta ja alapuolelta akuston etuosasta. Tämän jälkeen alapuolen pultit irrottamalla akusto on erotettavissa autosta. Akusto tulee tukea erotuksen ajaksi asianmukaisesti. (26; 28)

Yläpuolen peltinen suojakansi on kiinnitetty kehikkoon pulteilla ja tiivistetty vahvalla tiivisteliimalla. Kannen keskiosassa on kiinni liimattu osio, johon ei pääse työkaluilla käsiksi ja vaatii mahdollisesti voimankäyttöä, jotta kansi lopulta irtoaa. Muotoilunsa ansiosta kansi on uudelleenkäytettävissä, jos irrotustyö tehdään riittävää varovaisuutta noudattaen. Moduuleihin käsiksi pääsyyn tulee ensimmäisenä irrottaa akuston takaosassa, ”penthousessa”, sijaitsevat komponentit. (24)

Moduulien irrotus tapahtuu avaamalla ulommat moduulit kehikkoon kiinnittävät pultit moduulien ulkoreunoilta ja löysäämällä sisemmältä puolelta pultit, jotka kiristävät moduulia kiinni pitäviä klipsejä. Akuston etupäädystä irrotetaan moduulin terminaalit, jonka jälkeen moduuli on liu’utettavissa pois kehikosta. Keskimmäiset moduulit ovat haastavat irrottaa, koska ne täytyy nostaa keskeltä ylös eivätkä ole liu’utettavissa sivuista pois. Nosto on kuitenkin mahdollista käyttäen apuna kampeamistyökaluja, kuormaliinoja ja useampaa nostoapulaista, kuten kuvassa 16 osoitetaan. Moduuleja ei ole kannattavaa purkaa tätä pidemmälle, koska moduulit ovat sinetöityjä yksiköitä. (24; 29)



Kuva 16. Model 3:n sisempien moduulien irrotus nosturilla ja liinoilla. Ulommat moduulit voi liu'uttaa kehikosta sivusuunnassa pois. (29)

Vaihdettavien moduulien jännitetason tulee vastata muiden akustossa olevien moduulien jännitetasoa ja moduulien jännitetasot tulee tasapainottaa tarvittaessa asianmukaisella välineistöllä.

4.3.3 Yhteenveto

Tesla Model 3:n akuston irrotustyö on Model S:ään verrattuna huomattavasti suuritöisempi. Työ ei ole vaativuudeltaan moottorin irrotustyön tasoa, mutta edellyttää tekijältä ajoneuvoteknistä kokemusta. Akuston koteloinnissa ja komponenteissa käytetään erikoiskannallisia pultteja, jotka vaativat erikoishylsyjä niiden avaamiseen. Akuston suojakotelointi on varovaisuudella avattavissa ehjänä ja siten uudelleenkäytettävissä. Moduulit ovat irrotettavissa tavanomaisilla työkaluilla; haasteeksi muodostuu lähinnä moduulien suuri koko- ja paino, vaatien raskaiden kappaleiden liikutteluun soveltuvan välineistön. (25; 28)

Koska Model 3:n akusto pitää sisällään neljä suurikokoista moduulia, jotka eivät ole kohtuullisella työpanoksella ja välineistöllä purettavissa pidemmälle, tulee moduulien hankintakustannus suureksi tekijäksi akuston korjattavuuden ja sen kannattavuuden kannalta. Elon Muskin mukaan yhden moduulin

vaihtokustannus olisi noin 5–7 tuhatta Yhdysvaltain dollaria. Toisaalta Musk on myös ilmoittanut Model 3:n akuston käyttöiäksi n. 480–800 tuhatta kilometriä. Jos tämä todellisuudessa pitää paikkansa, moduulien vaihtotarpeen pitäisi olla melko vähäistä. (30)

Koska Model 3 on ollut markkinoilla melko vähän aikaa, siihen ei ole vielä tällä hetkellä Euroopassa saatavilla juurikaan käytettyjä moduuleita eikä kokonaista akustoa. Parin vuoden kuluttua todennäköisesti käytettyjä purkukomponentteja alkaa löytymään paremmin markkinoilta, kun kolaroituja ajoneuvoja saadaan purettaviksi. Uusien akkumoduulien myynti kuitenkin saattaa jäädä Teslan yksinoikeudeksi moduulien korkean kehitysasteen ja monimutkaisen valmistusmenetelmän vuoksi.

4.4 Nissan Leaf 24 kWh ZE0 2010–2012

Nissan Leaf (kuva 17) oli yksi ensimmäisiä suuremman suosion saaneita täyssähköautoja ja maailman eniten myyty sähköautomalli vuoteen 2020 saakka, jolloin Tesla Model 3 otti tittelin itselleen. Nissanin lähestymistapa sähköautomarkkinoille oli Teslaan verrattuna täysin eri. Tavoitteena oli saada markkinoille kuluttajille tutussa formaatissa oleva helposti lähestyttävä ja verrattain edullinen täyssähköauto polttomoottorikäyttöisen auton vaihtoehdoksi. Sähkömoottori sijaitsee auton etuakselilla ja voima välittyy eturenkaille. Nissan Leafin ensimmäistä sukupolvea on tehty 24 kWh:n ja 30 kWh:n kapasiteetin akuilla, joista suurempi tuli markkinoille vuonna 2016 pienemmän akuston rinnalle. Leaf on ollut markkinoilla jo niin pitkään, että markkinoilla on jo runsaasti takuuajan

ylittäneitä ajoneuvoja. Auto onkin osoittautunut niin Suomessa kuin maailmallakin hyvin modifioitavaksi ja kotimekaanikkoystävälliseksi sähköautoksi. (31; 32)

Kuva 17. Ensimmäisen sukupolven Nissan Leaf (33).

4.4.1 Akuston rakenne

Ensimmäisen sukupolven Nissan Leafin akusto koostuu 48 moduulista. Yksi moduuli sisältää 4 kpl Automotive Energy Supply Corporationin (AESC) valmistamaa pussikennoja, jotka ovat koteloituna metallirakenteeseen. Moduuli on käytännössä sinetöity, eikä sitä ole suunniteltu avattavaksi. Kuvassa 18 näkyy moduulin rakenne ilman metallikotelointia. Yhden kennon nimellisjännite on 3,75V. Kaksi kennoista on kytketty rinnan ja kaksi sarjaan. Yhden moduulin nimellisjännite on 7,5 V ja yhteensä akuston jännite on 350 V. Kennot ovat kemialtaan LMO-tyyppiä. (34; 35)

Kuva 18. Yksi Nissan Leafin moduuli avattuna demonstraatiotarkoitukseen. Moduulissa on neljä pussikennoa pinottu päällekkäin. Moduuleja ei ole suunniteltu avattaviksi. (35)

Moduulit on sijoitettu runkokehikon etu- ja keskiosassa horisontaalisesti päällekkäin ja takaosassa vertikaalisesti riviin tilankäyttö maksimoiden. Moduulit on kiinnitetty toisiinsa moduulien kulmissa olevien reikien läpi kulkevilla pitkillä pulteilla. Kehikon etuosassa on 4 kappaletta 4 moduulin pinoja, keskellä 4 kappaletta 2 moduulin pinoja ja takana yksi 24 moduulin pino. Asettelu on havainnoitavissa kuvassa 19. Moduulit on kytketty sarjaan kuparista valmistetuilla johtimilla, jotka on koteloitu muoviin sähköturvallisuussyistä. Moduulissa on kolme terminaalia: plus, jännitemittaus ja miinus. Moduuleita on kahta tyyppiä, erona plus- ja miinusnapojen järjestys. (35)

Akuston lämmönhallinta on toteutettu täysin passiivisella ilmajäähdytyksellä moduulien koteloinnin riittävän lämmönsiirtokyvyn mahdollistamana. Runkokehikon suojakotelointi on ilmatiivis ja kansi on tiivistetty kumitiivisteellä. Kennojen tuottama lämpö siirtyy ilmaan johtumisella ja konvektiolla. (35)

Akuston BMS on sijoitettu taaimmaisen moduulipinon vasempaan päätyyn ja kontaktorit moduulien väliin etuosaan. Keskellä kehikkoa (kuvassa 19) on korkeajännitesulakkeen sisältävä huoltoliitin, joka irrotettuna erottaa moduulit

toisistaan sähköturvallisemman työskentelyn varmistamiseksi. Korkeajännite-sulakekokoonpanon alle on sijoitettu akun lämmityspiirin komponentit. (35)

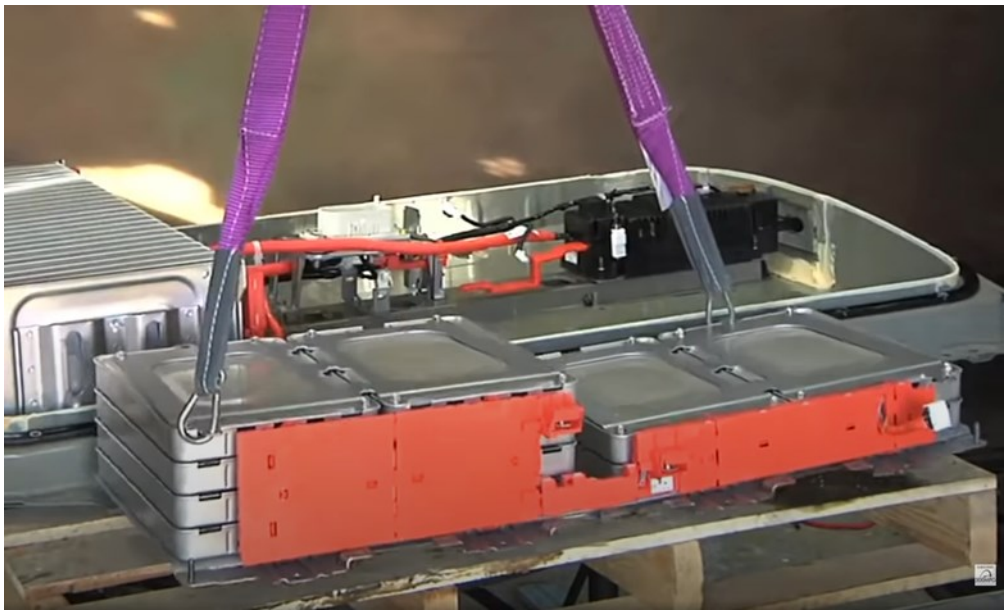
Kuva 19. Nissan Leafin akusto kansi avattuna, huoltoliittimen ja korkeajännite-sulakkeen kiinnitysalusta keskellä, kontaktoriyksikkö vasemmalla ja BMS oike-alla alhaalla moduulipinon päädyssä (irrotettu kuvassa). (35)

4.4.2 Akuston purettavuus

Nissan Leafin akkukehikko on kiinnitetty ajoneuvon pohjaan alapuolelta sekä takaosasta vaakatasossa pulttikiinnityksellä, yhteensä 10 kiinnityspultilla. Akusto on suojattu auton alapuolelta suojamuoveilla, jotka irrottamalla kehikko, kiinnityspultit, korkeajännitejohtosarjan liitin sekä akunhallintayksikön johtosarjaliitin saadaan näkyviin. Liittimet irrotetaan ja akusto tuetaan asianmukaisesti alta, jotta kiinnityspultit voidaan irrottaa. Tämän jälkeen akusto voidaan erottaa ajoneuvosta. (36)

Moduulit suojaava peltikotelointi on kiinnitetty kehikkoon yläpuolelta ulkoreunoistaan ja keskiosasta. Irrottamalla huoltoliittimen kiinnitysalustan ja suojakannen moduulit saadaan esiin. Moduulien irrottamiseksi kehikosta, tulee ensimmäiseksi irrottaa BMS-yksikkö. Moduuleista on tämän jälkeen irrotettava niihin klipseillä kiinnitetyt johtosarjat. Korkeajännitejohtosarjat ovat kiinni

moduulipinojen johdinterminaaleissa mutterikiinnityksellä. Vasemman ja oikean puolen vaakatasossa olevat neljän ja kahden kappaleen moduulipinot on kiinnitetty läpipulteilla pinojen pohjalla olevaan tukilevyyn. Tukilevyt on kiinnitetty kehikkoon pulteilla, ja ne irrottamalla moduulipinot ovat tukilevyineen erotettavissa. Levyjen päädyissä on metallilenkit tarkoitettuna nostoliinojen kiinnitystä varten, ja korkean painon vuoksi nosto onkin suositeltavaa tehdä esimerkiksi moottorinostimella. Kuvassa 20 on esimerkki moduulien nostotavasta. Pystytasossa olevan 24 moduulin rivi on nostettavissa päätymoduulien päissä olevissa tukilevyissä olevista nostolenkeistä. (37; 38)



Kuva 20. Vaakatasossa olevien moduulipinojen nosto akkukehikosta. Kehikosta irrallaan olevat moduulit voidaan purkaa tämän jälkeen erilleen. (38)

Moduulit ovat irrotettavissa toisistaan irrottamalla johdinrivistö moduuleista sekä moduulin kulmissa olevat pinnapultit irrottamalla. Moduulien väleissä on välilevyt, jotka tekevät moduulien väliin ilmaraon ja jakavat puristusvoiman tasaisesti moduulin kotelointiin. Pystypinoissa olevat 24 moduulia ovat irrotettavissa kehikosta pulttaamalla johdinterminaalit irti moduuleista ja irrottamalla moduulien kulmissa olevat pitkät pultit, jotka tukilevyn kanssa puristavat moduulit toisiaan vasten. Tämän jälkeen moduulit ovat yksittäin irrallisia. (39; 40)

Yksittäiset moduulit ovat vaihdettavissa esimerkiksi purkuautosta saatuihin moduuleihin. Ehtona on, että vaihdettavan moduulin kennojännitteen tulee olla tasapainossa muiden käytössä olevien moduulien kanssa. Jos asia ei näin ole moduulia asennettaessa, ajoneuvo voi mennä vikatilaan antaen vikailmoituksen asiasta ja jopa estää ajoneuvolla ajamisen täysin. Tulee myös varmistua, että moduulin tyyppi vastaa vaihdettavaa moduulia, sillä Leafin akustoissa on vuosimallikohtaisia eroja esimerkiksi moduulin koteloinnissa. Perusrakenne vuosimallista riippumatta pysyy hyvin pitkälti samana, joten tätä informaatiota voi varauksella soveltaa myös käsiteltyä uudempiin vuosimalleihin ja seuraavan sukupolven Leafiin. Uudempien akustojen kohdalla akkukehikon peltikansi on kumitiivisteen sijaan liimattu kiinni ja vaatii enemmän työtä kannen avaamiseksi. (35)

4.4.3 Yhteenveto

Nissan on selkeästi suunnitellut Leafin akuston täysin huollettavaksi. Akusto on täysin purettavissa moduuleihin asti ilman komponenttien uhraamista purkuprosessissa. Moduulit itsessään ovat sinetöityjä yksiköitä, eikä niitä kannata purkaa pidemmälle. Koska moduuleita on 48 kappaletta, tekee se yksittäisen moduulin kustannuksen melko alhaiseksi ja helpottaa tarkempaa korjaustyötä yhden moduulin vioittuessa. Irrotus- ja purkutyö on mahdollinen hyvän ajoneuvoteknisen tuntemuksen omaavalle henkilölle.

Vioittuneen moduulin selvittäminen ja akuston diagnosointi on myös yksinkertaista akuston BMS:n ollessa yhteydessä ajoneuvon muihin ohjainlaitteisiin ja moduulien kennoparien jännitteet ovat luettavissa jopa tavanomaisella OBD2-vikakoodinlukijalla. Ilmaisia sovelluksia on saatavilla, esimerkiksi Leaf Spy Lite Android -puhelimille ja tableteille. (41)

Nissan Leaf on yksi harvoista sähköautomalleista, jolle Suomesta löytää erikoistuneen sähköauton akuston korjauspalvelun, kuten esimerkiksi Dala’s EV Repair Vaasassa. Dala’s EV Repair on Nissan Leafin akustojen korjaamiseen ja vaihtotöihin erikoistunut toimija, ja se vaihtaa eri-ikäisiin Leafeihin hyväkuntoisia akkupaketteja purkuajoneuvoista. Tarjontaan kuuluu myös muun muassa akkukapasiteettipäivitykset sekä tarvikkeet, jos haluaa itse vaihtaa akkupaketin

Leafiin. Toinen akustojen vaihtoja tarjoava yritys Suomessa on Pistokehybridi.fi. Leafiin ei ole Suomessa juuri yksityishenkilöille tarjolla purkuakustoja, ja muuallakin Euroopassa tarjonta on hyvin vaihtelevaa. Kolmannen osapuolen moduulikittejä Leafiin tarjoaa esimerkiksi espanjalainen yritys Renovables del Sur. (42; 43; 44)

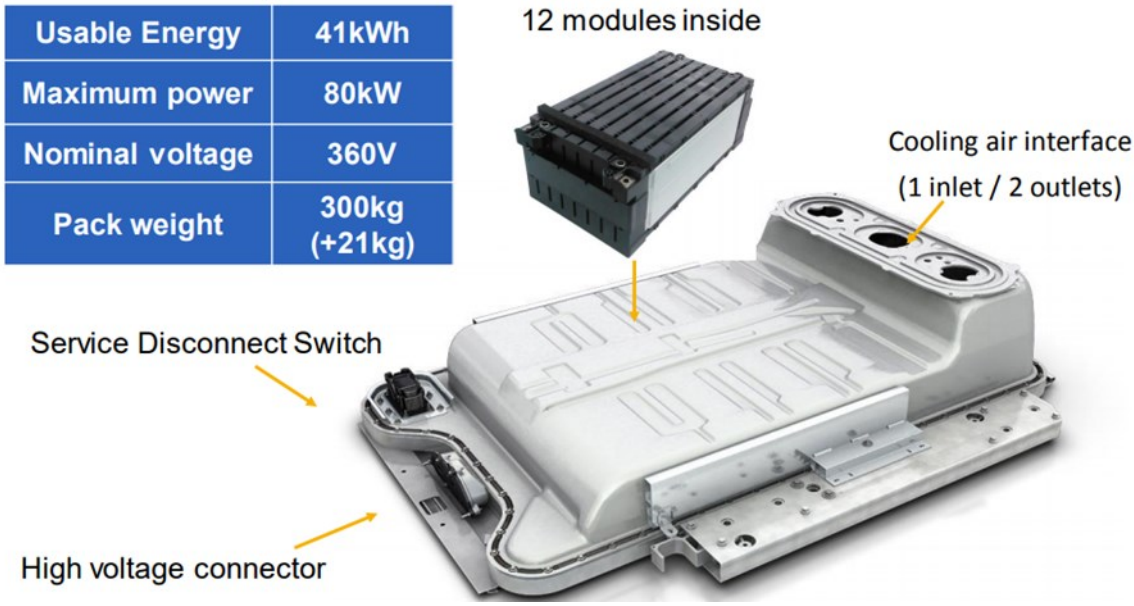
4.5 Renault Zoe 41 kWh ZE40

Renault Zoe (kuva 21) on Renaultin vuonna 2012 tuotantomallin julkistama B-segmentin sähköauto. Zoe on Euroopassa yksi myydyimmistä sähköautomalleista ja vuoden 2019 loppuun mennessä autoa oli myyty n. 182 000 kappaletta. Nissan Leafin tavoin auto on etuvetoinen sähkömoottorin sijaitessa etuakselilla. Autoa on ensimmäisenä valmistettu 22 kWh:n akulla vuosina 2012–2016. Vuodesta 2016 lähtien akuston kapasiteetti kasvoi 41 kWh:iin ja se oli markkinoilla vuoteen 2019 asti. Tällä hetkellä Zoen akku on kapasiteetiltaan 52 kWh, ja se tuli markkinoille vuonna 2019. Suomeen tuotiin 41 kWh:n mallista lähtien. Zoen akkupaketti on ulkomitoiltaan ja rakenteeltaan identtinen eri kapasiteettiversioissa. Suuremmat kapasiteetit on saavutettu parantuneella kennokemialla ja kennosuunnittelulla. (45)

Kuva 21. Renault Zoe ZE40 (45).

4.5.1 Akuston rakenne

Renault Zoen akusto koostuu 12 sarjaan kytketystä moduulista, joissa jokaisessa on 16 kappaletta LG Chemin valmistamaa pussityyppistä LGX E63 -NMC-kennoa. Kennot on kytketty moduulissa 2P 8S -konfiguraatioon. Kennon nimellisjännite on 3,75 V, moduulin nimellisjännite 30 V ja akuston nimellisjännite 360V. Moduulit ovat toisiinsa nähden identtisiä. (46; 47) Akkupaketti, moduuli sekä liittimet ovat esitettynä kuvassa 22.



Kuva 22. Renault Zoen akusto ja akkumoduuli (46).

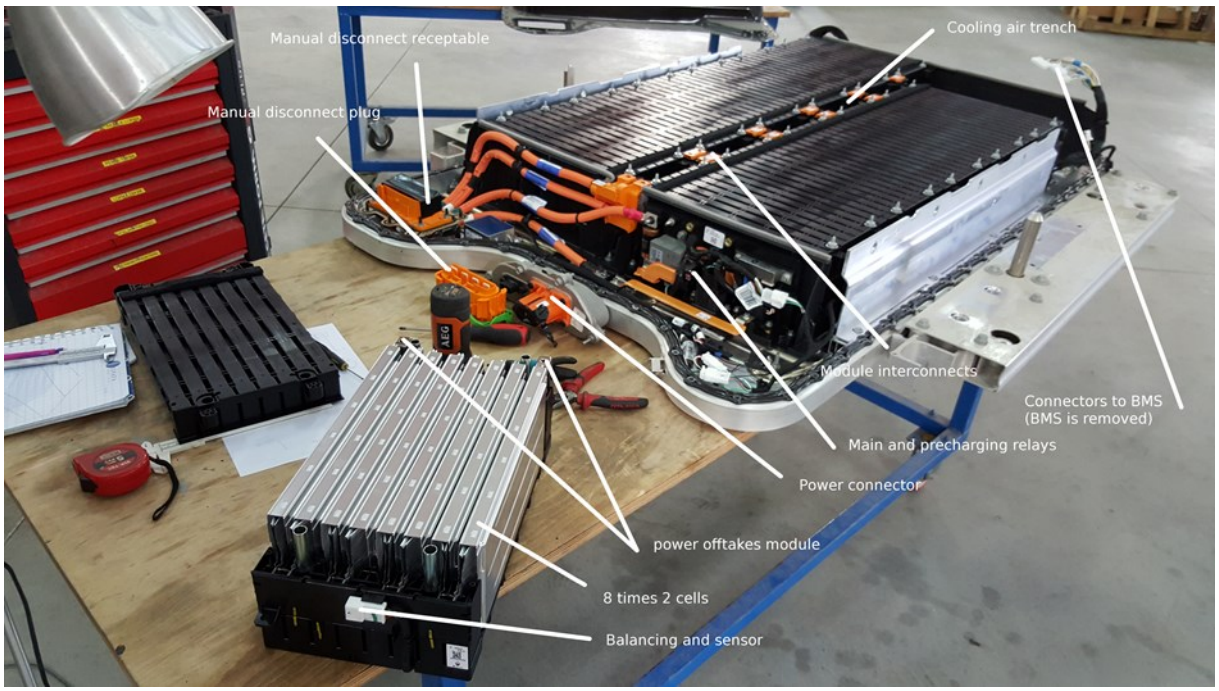
Moduulit on sijoitettu kahteen riviin runkokehikkoon, joka on valmistettu alumiinista. Kehikon kansi on teräspeltiä. Akuston lämpötilaa hallitaan kuvassa 22 näkyvällä aktiivisella ilmakierrolla kehikon koteloinnin takaosassa olevien ilmakiertokanavien kautta, jotka on yhdistetty ajoneuvon ilmastointijärjestelmään. Moduulit on kiinnitetty runkokehikon pohjaan kahteen riviin kulmistaan pinnapulttien avulla. Moduulien päällä on irrotettavat metalliset tukilevyt jäykistämässä rakennetta. Akuston BMS sijaitsee kehikon takaosassa vasemmalla puolella moduulien päällä. Kontaktoriyksikkö, päävirtasulake ja korkeajänniteliitin ovat kehikon etuosassa. Runkokehikko kiinnittyy ajoneuvoon kehikon vasemmalla ja oikealla puolella olevista profiilipalkeista neljällä pultilla ja yhdellä ohjuritapilla per puoli. (48; 49)

4.5.2 Akuston purettavuus

Renault Zoen akuston irrotusta varten poistetaan akuston huoltoliitin auton sisäkautta, irrottamalla auton pohjassa akuston edessä oleva suojamuovi, jonka takana on akuston maadoituskaapeli, päävirtaliitin ja väyläliitin. Liittimet ja maadoituskaapeli irrotetaan. Akusto tuetaan alapuolelta asianmukaisella tuella ja kiinnityspultit irrotetaan vasemmalta ja oikealta. Tämän jälkeen akusto on erotettavissa autosta. (50) Esimerkki irrotusjärjestelystä kuvassa 23.

Kuva 23. Renault Zoen akuston erotus autosta nosturien avulla (50).

Teräksinen suojakansi on kiinnitetty reunoiltaan pulteilla. Kannen ja kehikon välissä on uudelleenkäytettävä kumitiiviste. Kannen irrotuksen jälkeen kehikon etupuolelta irrotetaan huoltoliitin, jolla akut erotetaan virrattomiksi muusta järjestelmästä. Pultein muovikannakkeeseen kiinnitetty kontaktoriyksikkö irrotetaan komponentteineen. Pääsulakkeen 4 johtosarjaa irrotetaan molempien akkurivien pääterminaaleista. Moduuleista irrotetaan anturiliittimet sekä pulttikiinnitteiset johdinterminaalit. Tämän jälkeen moduulit ovat irrotettavissa kehikosta avaamalla moduulin kulmissa olevat neljä pulttia ja nostamalla moduulit yksitellen pois kehikosta. Moduulit painavat n. 16 kilogrammaa, joten ne ovat nostettavissa käsivoimin. (48; 49) Kuvasta 24 voi havaita kontaktoriyksikön, moduulien sijoituksen sekä kiinnitystavan kehikossa.



Kuva 24. Zoen akusto avattuna. Yhdestä moduulista purettu muovipaneeli päältä pois ja kennoparit metallikuorissaan ovat näkyvillä. (49)

Moduuleja vaihdettaessa vaihdettavan moduulin jännitetason tulee vastata muiden akuston moduulien jännitetasoa ja moduulit tulee tasapainottaa tarvittaessa ennen asennusta.

Moduulit ovat avattavissa irrottamalla moduulin muovisen yläkannen kahdeksan ristipääruuvia. Tämän jälkeen moduulin päädyistä irrotetaan muovipaneelit, kuten kuvassa 24, jotka paljastavat kahden sarjaan kytketyn kennon navat ja laserhitsatun terminaaliliitoksen, jolla kennoparit kytkeytyvät sarjaan viereiseen kennopariin. Kennoparit on metallikoteloitu yhteen ja vaikuttavat olevan irrotettavissa moduulista erottamalla hitsatun U-profiilityyppisen terminaaliliitoksen sekä purkamalla mahdollisesti muovikotelointia moduulien vapauttamiseksi. (48)

4.5.3 Yhteenveto

Renault Zoen akusto on suunniteltu kiitettävän yksinkertaiseksi sen huollettavuuden näkökannalta, sillä kaikki komponentit ovat irrotettavissa ilman

välttämätöntä vaurioittamista. Akuston irrotustyö autosta on yksinkertainen ja nopea suorittaa. Moduulit ovat yksinkertaisesti irrotettavissa ja verrattain alhaisen painonsa ansiosta helppoja vaihtaa yksittäin uusiin.

Moduulit itsessään ovat jokseenkin purettavissa, mutta työ vaatii tekijältään perehtyneisyyttä ja erikoistyömetodeja, kuten laserhitsausta tai vaihtoehtoisesti esimerkiksi pistehitsausta kennoterminaalien uudelleen kiinnittämiseksi. Koska moduulit ovat nopeasti vaihdettavissa ja niitä on 16 kappaletta, jää yhden moduulin vaihtotyöaika pieneksi ja vaihtomoduulin hinta melko alhaiseksi, mikä kannustaa mieluummin moduulin vaihtoon kuin sen purkamiseen pidemmälle.

Kirjoitushetkellä Renault Zoeen ei ole helposti saatavilla käytettyjä moduuleita eikä uusia saa ostettua merkkiliikkeestä. Renaultin merkkikorjaamot Suomessa eivät tee paikallisia moduulinvaihtotöitä, vaan akustot lähetetään kokonaisina ulkomaille korjattavaksi.

Täydellisiä akkupaketteja purkuautoista on melko vähän saatavilla ja kustannukset ovat tällöin korkeat, esimerkiksi Ruotsissa on yksi purkuauton kokonainen 40 kWh:n akusto myynnissä n. 9000 €:n hintaan. Yksittäiset purkuautojen moduulit ovat erittäin harvinaisia, eikä niitä ollut saatavilla kirjoitushetkellä. Tällä hetkellä komponenttien hankala saatavuus on suurimpana haasteena muuten varsin potentiaaliselle Renault Zoen kolmannen osapuolen akuston korjaustoiminnalle. Zoen kohdalla osien saatavuuden parantuminen lähivuosina olisi toivottavaa, sillä korjattavuuspotentiaali on korkea. (51)

Renault Zoeen on saatavilla Android-laitteille OBD2-lukijan avulla toimiva sovellus CanZE, jolla Zoen BMS:n ja muiden ohjainlaitteiden tietoja pystyy lukemaan reaaliajassa. Sillä voi esimerkiksi helpottaa vikatilanteissa moduulien ja jopa kennojen diagnosointia. (52)

4.6 BMW i3 60 Ah

BMW i3 (kuva 25) on BMW:n ensimmäinen sarjatuotantona valmistettu täyssähköauto, ja se on ollut markkinoilla vuodesta 2013 lähtien. BMW i3:n

matkustamon runko on valmistettu hiilikuidusta ja alustarakenne alumiinista. BMW i3:n suunnittelussa on pyritty korostamaan ympäristötietoisuutta autossa käytetyillä materiaalivalinnoilla. Hiilikuitukomponenttien valmistuksessa hiilijalanjälki on pyritty hyvittämään uusiutuvan energian käytöllä ja esimerkiksi ovet on valmistettu hamppukuitua sisältävästä komposiitista. (53)

Kuva 25. BMW i3 (54).

Täyssähkömallin lisäksi BMW tarjoaa autosta polttomoottorigeneraattorilla varustettua REx-mallia, joka lisää akuston ja sähkömoottorin rinnalle 650 cm^2:n kaksisylinterisen bensiinikäyttöisen polttomoottorin tuottamaan lisäsähköä ajokantaman kasvattamiseksi. BMW i3 on takavetoinen sähkömoottorin ollessa sijoitettuna taka-akselille. BMW käyttää markkinoinnissaan yksikkönä akuston kokonaiskapasiteetin sijaan yksittäisen kennon kapasiteettia ampeeritunneissa. Akuston kennojen kapasiteettia on kasvatettu 60 Ah:sta ensin 94 Ah:iin vuosimallista 2017 alkaen ja viimeisimpänä 120 Ah:iin vuosimallista 2019 alkaen. Kaikkia versioita sai myös REx-mallina. BMW i3:sta on markkinoilla myös tehokkaammalla sähkömoottorilla varustettu urheilullisempi i3s. (55)

4.6.1 Akuston rakenne

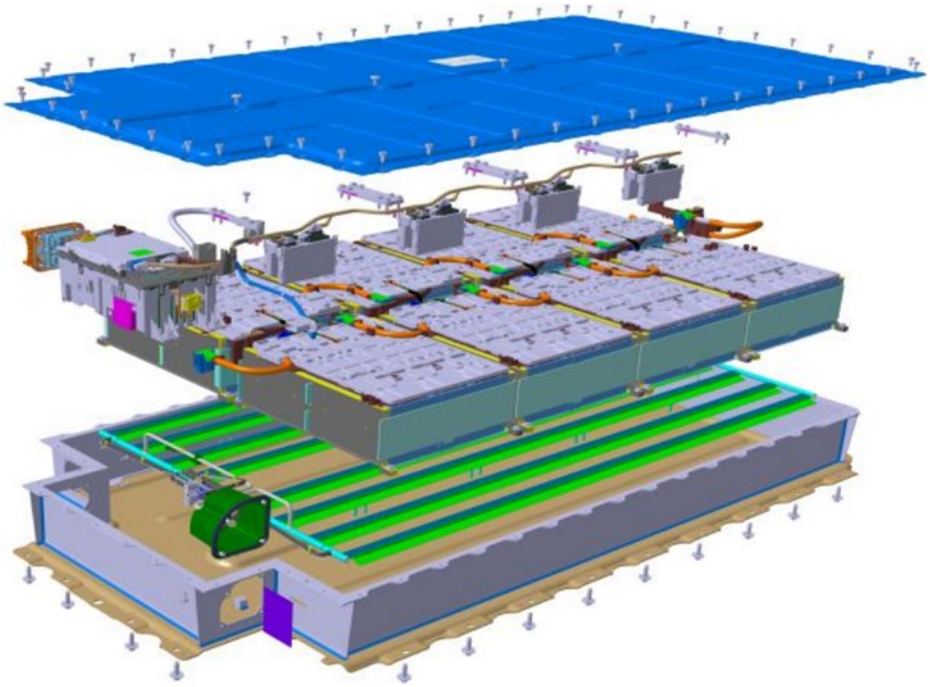
BMW i3:n akusto koostuu prismaattisista Samsung SDI:n valmistamista 60 Ah:n NCM-kennoista. Kuvassa 26 on esimerkki i3:n prismaattisesta kennosta. Moduuleja on sarjaan kytkettynä 8 kappaletta ja jokaisessa moduulissa on 12 kennoa sarjaan kytkettynä. Koko akusto on 96S-konfiguraatiossa. Yhden moduulin nimellisjännite on 45 V ja koko akuston nimellisjännite 360 V. Akuston lämpötilaa hallitaan kylmäainekierrolla moduulien alle jakautuvilla kanavilla. Kylmäainekierto toimii samassa auton ilmastointijärjestelmän kanssa. (56; 57; 58; 59)

Kuva 26. i3:n irrallinen akkukenno valmistusprosessissa ennen moduuliin asennusta (60).

Moduuleissa on kaksi kuuden akkukennon riviä, joissa kennot on sivuistaan liimattu toisiinsa kiinni ja näiden ympärille on liimattu muovikehys. Moduulin päädyt ja sivut on ympäröity kiinnihitsatulla alumiinikehikolla. Kennojen navat ja kennot sarjaan yhdistävät terminaalit ovat laserhitsattu toisiinsa. Jokaisen moduulin kyljessä on kiinni kennonvalvontapiiri moduulikohtaisen lämpötilan ja tasapainotuksen monitorointia varten. (60)

Runkokehikko on valmistettu alumiinista, ja kuten kuvasta 27 voidaan havaita, moduulit on sijoitettu kehikkoon kahteen neljän moduulin riviin kehikon

pituussuunnassa. Kehikossa on jokaiselle moduulille rakenne, joka toimii kiinnitysalustana ja lisätukena moduuleille. Runkokehikon etuosassa sijaitsee akuston BMS ja relekeskus, korkeajänniteliitin sekä kylmäaineputkien liitoselementti. Runkokehikko on päältä suljettu teräspellillä ja kumitiivisteellä pulttiliitoksin. Akusto on kiinnitetty auton pohjaan kehikon reunoilla olevista siivekkeistä pulttiliitoksin. (58; 61)

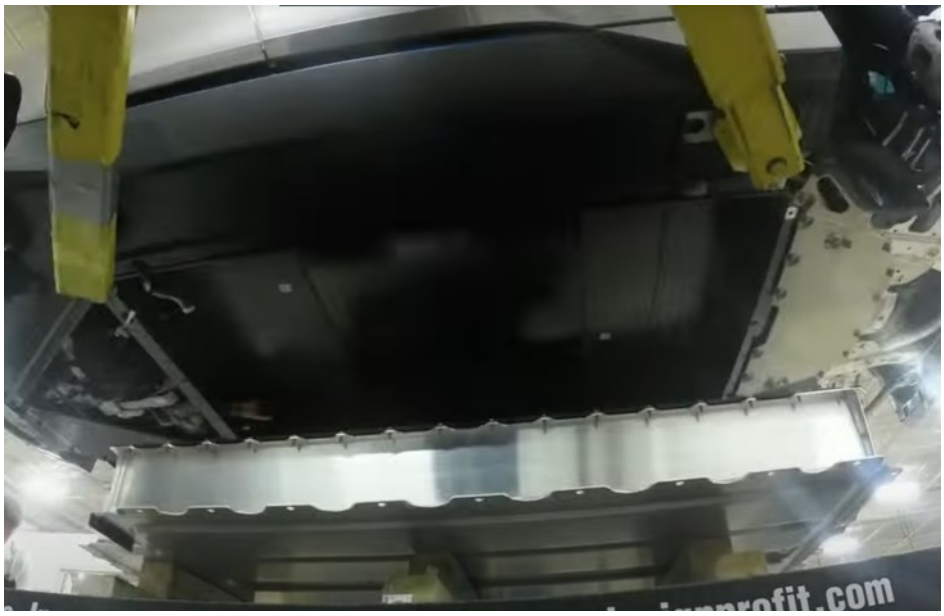


Kuva 27. BMW i3:n akuston CAD-malli, jossa näkyvissä jäähdytysjärjestelmä kehikon pohjalla, kahdeksan moduulia keskellä kennonvalvontapiireineen sekä kontaktorit ja BMS etuosassa (57).

4.6.2 Akuston purettavuus

BMW i3:n akusto irrotetaan tyhjentämällä ilmastoinnin huoltolaitteella auton ilmastointijärjestelmä kylmäaineesta ja irrottamalla kylmäaineputket, tukemalla akusto alapuolelta asianmukaisesti laajalta alalta, irrottamalla päävirtaliitin ja avaamalla runkokehikon kiinnityspultit. Tämän jälkeen akusto on erotettavissa autosta. Koska akuston runkokehikon ja ajoneuvon pohjaan ei ole jätetty paljoa

ylimääräistä tilaa, tulee erotuksessa olla varovainen, ettei kehikko pääse kääntymään tai liikkumaan erotuksen aikana. (59; 62; 63) Kuvassa 28 esitetään esimerkkitapa akuston erotuksesta.



Kuva 28. BMW i3:n akuston erotus ajoneuvosta pilarinosturin ja tukialustan avulla (59).

Suojakansi aukeaa avaamalla kiinnityspultit paljastaen moduulit ja muut komponentit, jotka näkyvät kuvassa 29. Moduulit irrotetaan kehikosta irrottamalla moduulit toisiinsa sarjaan yhdistävät johtimet ja johtosarjat sekä avaamalla moduulin reunoista kiinnityspultit. Yksi moduuli painaa noin 25 kg. Moduulin päällä on muovikansi klipsikiinnityksellä, ja se irtoaa nostamalla. Kannen alla on moduuliin sijoitetut lämpöanturit kuvan 30 mukaisesti sekä jokaiselle kennolle kulkeva johtosarja tasapainotusta varten. Koska moduuli on käytännössä sinetöity yksikkö hitsatun ulkokehikon ja kennojen välisen vahvan liimauksen takia, ei moduulia pysty purkamaan tätä pidemmälle sitä vaurioittamatta. (58; 59; 61; 64)

Kuva 29. BMW i3:n akkukehikko kansi avattuna ja moduulit sarjaan yhdistävät oranssit johtimet irrotettuina. Johtimen päässä on sähköliitin, jolla moduuli kytkeytyy toiseen. (58)

Kuva 30. BMW i3:n moduuli muovikansi avattuna. Johtosarjat lämpöantureille, terminaaliliitokset kennojen välillä sekä johtimen kiinteä liitos moduuliin ovat näkyvissä. (64)

Moduuleja vaihdettaessa vaihdettavan moduulin jännitetason tulee vastata muiden akuston moduulien jännitetasoa ja moduulit tulee tasapainottaa tarvittaessa ennen asennusta.

4.6.3 Yhteenveto

BMW on suunnitellut i3:n akuston lähtökohtaisesti huollettavaksi ja melko työystävälliseksi paketiksi. i3:n akuston ajatuksena on, että yksi mekaanikko voisi vaihtaa yksittäisen moduulin akustosta tehden työn alusta loppuun n. 3–4 työtunnissa. Irrotus- ja purkuprosessia havainnoidessa ilmeni tämän olevan melko todellinen arvio. (65)

BMW i3:n akusto on melko yksinkertainen irrottaa autosta. Se vaatii kuitenkin huolellista työotetta akuston erotuksessa autosta kiinnikkeiden vahingoittumisen välttämiseksi sekä erikoisvälineistönä ilmastoinnin huoltokonetta, sillä kylmäainetta ei tule päästää ilmakehään. Kylmäaineen sekaan laitettava öljy on myös erikoislaatuista, ja tämän kanssa tulee olla erityisen huolellinen, koska vääräntyyppinen öljy voi vaurioittaa ilmastointijärjestelmän komponentteja. Järjestelmässä käytetään Sanden SP-A2-ilmastointiöljyä. (66)

Moduulit ovat myös yksinkertaiset vaihtaa niiden ollessa irrotettavissa melko pienellä ympäröivien osien purkutyöllä. BMW i3:n akustossa tulee ottaa huomioon se, että järjestelmän ollessa kokonaan kytkettynä sarjaan, ei akustosta löydy huoltoliitintä, jolla järjestelmän kokonaisjännitteen saisi esimerkiksi puolitettua, kuten esimerkiksi Nissan Leafissa, joten akuston kanssa työskennellessä akuston yhteisjännite on korkeampi kuin muissa verratuissa ajoneuvoissa.

BMW i3:n oltua markkinoilla jo melko pitkään löytyy ajoittain i3:een eurooppalaisilta purkamoilta ja myös Suomesta niin kokonaisia akustoja kuin moduulejakin. Suomessa purkuautosta otettu moduuli maksaa 60 Ah:n versioon n. 500 € ja koko akusto n. 3500 €. Myös muihin kapasiteettiversioihin on tarjolla moduuleja ja akustoja. Hinnat purkuosille ovat siis melko kohtuulliset. BMW on tehnyt akustoihin turvajärjestelmän, joka kolaritilanteessa ohjelmallisesti lukitsee akuston BMS:n estäen kontaktorien toiminnan. Tämä rajoittaa akustojen hankintaa

siinä mielessä, että lukittu akusto on ohjelmallisesti avattavissa vain BMW:n erikoisdiagnostiikkalaitteella, joka on erittäin arvokas investointi ja lainalaitteen saaminen käyttöön on aina arpapeliä. (63; 67; 68)

Huomioon tulee ottaa myös se, että jos ajoneuvossa on lisävarusteluna ”talvipaketti”, on akuston johtosarjassa eroavaisuuksia ja väärän varustetason ajoneuvon akuston asentaminen voi johtaa korkeaan loisvirrankulutukseen. Myös akuston ohjelmistoversion tulee täsmätä ajoneuvossa siinä hetkessä olevaan versioon, muutoin auton ja/tai akuston ohjelmisto tulee päivittää täsmääväksi. Monella tapaa i3:n akusto on siis melko yksinkertainen kokonaisuus, mutta ohjelmistopuolen monimutkaisuus tekee työstä melko haastavan, jos vaihdettavat komponentit eivät ole kerralla täysin suoraan täsmääviä. (63)

5 Yhteenveto ja johtopäätökset

Insinöörityön keskeisenä kysymyksenä oli, kuinka pitkälle ja laaja-alaisesti sähköauton akustoa pystyy purkamaan korjattavuuden kannalta. Käsiteltävien ajoneuvomallien akustorakenteita tarkastellessa osoittautui, ettei kennotasolle saakka pääsääntöisesti ole kannattavaa purkaa, moduulitason ollessa järkevin vaihtoehto. Moduulit on käsitellyissä autoissa valmistettu niin, ettei niitä pysty avaamaan ja purkamaan ilman koteloinnin tai muiden moduulin komponenttien jonkin asteista vaurioittamista.

Akuston huollettavuus on erittäin tärkeä osa sähköauton elinkaarta. Akuston irrotustyö osoittautui verrattaessa esimerkiksi polttomoottorilla varustetun henkilöauton moottorin irrotukseen, huomattavasti vähemmän vaativaksi työksi. Kun polttomoottorin irrotusaika on noin 1-8 tuntia, on akusto yleensä irrotettavissa 10–60 minuutissa. Jos akuston kantta ei ole liimattu kiinni, myös moduuleihin käsiksi pääseminen on melko nopeaa. Teslan akustot ovat käsiteltyjen automallien ainoat, joissa kansi on liimattu kiinni, mikä akuston avaustyötä huomattavasti. Tesla Model 3:n akusto myös vaatii muita verrattuja akustoja enemmän ympäröivien komponenttien purkamista. Molempien Teslojen kohdalla suojakannen vaurioituessa uuden kannen hankkiminen voi osoittautua

haasteelliseksi. Positiivista on se, että kaikissa käsitellyissä ajoneuvoissa akusto on huollettavissa, vaikka työajat vaihtelevat mallista riippuen.

Havaintojen perusteella käsiteltyjen sähköautojen akustot ovat työaskelmäärältään varsin yksinkertaisia korjata ja huoltaa. Varjopuolena moduulien tai muiden komponenttien korjaaminen akustosta vaatii lähes poikkeuksetta koko akuston irrottamisen autosta. Akuston irrotus käsitellyistä autoista ei työajallisesti ole pitkäkestoinen työvaihe, mutta työturvallisuuden takaamiseksi akun irrotukseen tulee käyttää asianmukaista nostovälineistöä. Akusto tulee aina ennen irrotustyön ja purkamisen aloittamista tehdä jännitteettömäksi ajoneuvovalmistajan ohjeistuksen mukaan. Tärkeä huomioon otettava asia on myös, että vaihdettavaksi hankittavien komponenttien yhteensopivuuden on oltava hyvin selvillä ennen työn suorittamista. Komponentit voivat olla ulkoisesti hyvin samanlaisia, mutta sisäisesti tai ohjelmistoltaan eriäviä esimerkiksi vuosimallista ja varustetasosta riippuen.

Moduulien ja kokonaisten akustojen saatavuus ja hankintakanavat ovat hyvin vaihtelevat niiden ollen suurin haaste akustojen korjaustoiminnalle. Esimerkiksi Renault Zoe, joka osoittautui kokonaisuudessaan varsin korjausystävälliseksi ja on Euroopassa verrattain suosittu sähköautomalli, on komponenttien saatavuudeltaan huonoin verrattuna muihin käsiteltyihin automalleihin. Käytännössä auton joutuu toimittamaan merkkiliikkeeseen, jos akusto vaatii uusia moduuleja, käytettyjen moduulien ollessa vielä hyvin harvinaisia. Tällä hetkellä Suomesta ja ulkomailta löytää parhaiten komponentteja Tesla Model S:ään sekä Nissan Leafiin, mutta myös BMW i3:een löytyy moduuleja.

Kokonaiset akustot ovat uutena edelleen hyvin kalliita, mutta käytettyjen akustojen hinnat ovat jo laskussa. Ajan myötä akkuteknologian kehittyessä uusien akustojen hintojen odotetaan halpenevan. Samalla käytettyjenkin akustojen arvot todennäköisesti laskevat. Ottaen huomioon akustojen pitkän eliniän sekä myös korjaustarpeen ollessa melko harvinaista, ei akuston korjaaminen sähköauton omistuksen kokonaiskuluissa viime kädessä ole usein kovinkaan suuri. Moduulien vaihtaminen on hyvin mahdollista käsiteltyihin ajoneuvomalleihin, mutta moduulien hinta riippuu hyvin pitkälti moduulin koosta. Mitä useampi

moduuli akustossa on, sitä alhaisempi sen hinta yleensä on. Aika näyttää, miten kolmannen osapuolen valmistajat lähtevät akkumarkkinoille tarjotakseen asiakkaille uusia- ja/tai kunnostettuja moduuleita kilpailukykyisemmillä hinnoilla.

Sähköautokannan ikääntyessä ja useampien käyttäjien alkaessa etsimään vaihtoehtoisia korjaustapoja, olisi tärkeää, että kolmannen osapuolen palveluntarjoajat pääsisivät mukaan palvelemaan uutta ja kasvavaa asiakaskuntaa. Kolmannen osapuolen korjaustoimintaa Suomessa on lähtenyt laajentamaan pienemmille autokorjaamoyrittäjille Örum. Örumilla on korkeajänniteajoneuvojen korjaamiseen keskittyvä e-Expert-konsepti, jossa tarjotaan pienemmille autokorjaamoyrittäjille asianmukaista koulutusta sähköautojen tekniikkaan, huoltoon sekä korjaamiseen. Konseptiin kuuluvat yritykset listataan e-Expertin verkkosivuilla ja siihen kuuluu tällä hetkellä 18 autokorjaamoa Suomessa. Tämä on mielenkiintoinen tapa saada suomalaisia korjaamoita pääsemään kehitykseen mukaan autokannan sähköistyessä kasvavaa vauhtia. Sähköautojen korjaamiseen erikoistuneita korjaamoita ei Suomessa vielä montaa ole ja niitä tarvitaan enemmän, jos ikääntyviä sähköautoja halutaan vielä tulevina vuosina pitää tien päällä.

Lähteet

1 BU-301a Types of Battery Cells. Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 4.11.2020.

2 Löbberding, Hendrik; Wessel, Saskia; Offermanns, Christian; Kehrer, Mario; Rother, Johannes; Heimes, Heiner & Kampker, Achim. 2020. From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types. Verkkoaineisto. World Electric Vehicle Journal. <https://doi.org/10.3390/wevj11040077>. 10.12.2020. Luettu 10.1.2021.

3 BU-205 Types of Lithium-ion Batteries. Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 4.11.2020.

4 Warner, John. 2019. Lithium-Ion Battery Chemistries: A Primer. E-kirja. Elsevier.

5 Korthauer, Reiner. 2018. Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications. E-kirja. Springer.

6 The Composition of EV Batteries: Cells? Modules? Packs? Let's Understand Properly!. Verkkoaineisto. Samsung SDI. <https://www.samsungsdi.com/column/all/detail/54344.html>. Luettu 14.12.2020

7 BU-908: Battery Management System (BMS). Verkkoaineisto. Battery University. <https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/how_to_monitor_a_battery>. Luettu 5.11.2020.

8 Electric Vehicle Thermal Management System. Verkkoaineisto. Dober. <https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems#electric_vehicle_thermal_management_system>. Luettu 14.12.2020.

9 Superior Battery Technology. Verkkoaineisto. Torqueedo. <https://www.torqeedo.com/en/technology-and-environment/battery-technology.html>. Luettu 4.3.2021.

10 Fowler, Steve. 2014. Elon Musk: Tesla boss on EVs with 500-mile range and colonies on Mars. Verkkoaineisto. Auto Express. <https://www.autoexpress.co.uk/tesla/87943/elon-musk-tesla-boss-on-evs-with-500-mile-range-and-colonies-on-mars>. 21.7.2014. Luettu 16.5.2021.

11 Tesla Model S 85. Verkkoaineisto. Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org/car/1031/Tesla-Model-S-85>. Luettu 12.2.2021

12 Tesla Battery Modules > 85-TYPE. Verkkoaineisto. HSR Motors. <https://hsrmotors.com/products/battery_modules>. Luettu 13.2.2021.

13 TESLA MODEL S BATTERY TEARDOWN. 2017. Verkkoaineisto. YouTube. jehugarcia. <https://www.youtube.com/watch?v=NpSrHZnCi-A&t=99s>. 25.2.2017. Katsottu 12.2.2021.

14 Tesla's Battery Tech Explained: Part 3 - The Pack. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. EV-Tech Explained. <https://www.youtube.com/watch?v=5b8u5EyZ5v8>. 15.4.2018. Katsottu 13.2.2021.

15 Tesla's Battery Tech Explained: Part 2 – The Module. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. EV-Tech Explained. <https://www.youtube.com/watch?v=bNd-yJtRPhk>. 7.4.2018. Katsottu 13.2.2021.

16 Tesla Battery Module breaking (headache)!!. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. Nice-oscar. <https://www.youtube.com/watch?v=8bBpMvYrXAc>. 24.1.2018. Katsottu 12.2.2021.

17 Tesla model S 85 How to remove the battery. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. Mécanique auto MF8. <https://www.youtube.com/watch?v=5b8u5EyZ5v8>. 5.2.2018. Katsottu 15.2.2021.

18 Tesla Model S module 5,3kWh -24 VDC. Verkkoaineisto. EV Europe. <https://eveurope.eu/en/product/tesla-model-s-module-53-kwhr-24/>. Luettu 13.2.2021.

19 Lambert, Fred. 2017. Tesla Model 3: Elon Musk confirms first production unit built. Verkkoaineisto. Electrec. <https://electrek.co/2017/07/08/tesla-model-3-production-elon-musk/>. 8.7.2017. Luettu 15.5.2021.

20 Holland, Maximilian. 2020. Tesla Passes 1 Million EV Milestone & Model 3 Becomes All Time Best Seller. Verkkoaineisto. CleanTechnica. <https://cleantechnica.com/2020/03/10/tesla-passes-1-million-ev-milestone-and-model-3-becomes-all-time-best-seller/>. 10.3.2020. Luettu 19.5.2021.

21 Tesla Model 3 Long Range Dual Motor. Verkkoaineisto. Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org/car/1321/Tesla-Model-3-Long-Range-Dual-Motor>. Luettu 30.2.2021

22 Iqtidar, Ali. 2018. Battery expert: Tesla Model 3 has 'Most advanced large scale lithium battery ever produced' [video]. Verkkoaineisto. Evannex.

<https://evannex.com/blogs/news/tesla-s-battery-pack-is-both-mysterious-and-alluring-work-in-progress>. 27.6.2018. Luettu 23.2.2021.

23 Tesla Model 3 – Cooling System Overview. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. Ingineerix. <https://www.youtube.com/watch?v=vgfXyLLaO7I>. 23.7.2018. Katsottu 22.2.2021.

24 Tesla Model 3 Battery Removal and Disassembly. 2018. Verkkoaineisto. YouTube. Jack Rickard. <https://www.youtube.com/watch?v=PvCOcBynlq0>. 13.5.2018. Katsottu 23.2.2021.

25 Tesla Battery Teardown – I Open up The Model 3 Standard Range Plus Battery To See What's Inside. 2021. Verkkoaineisto. YouTube. Superfast-Matt. <https://www.youtube.com/watch?v=8Wamu0hyngU>. 4.3.2021. Katsottu 16.4.2021.

26 Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 2). 2020. Verkkoaineisto. YouTube. All EV Canada. <https://www.youtube.com/watch?v=OD1gTUVakBY>. 23.2.2020. Katsottu 22.2.2021

27 How NOT to extract the 21700 cells from a Tesla Model 3 battery. 2019. Verkkoaineisto. YouTube. EVEngineering. <https://www.youtube.com/watch?v=gQcvZn7-_VE>. 31.8.2019. Katsottu 23.2.2021

28 Tesla Model 3 Battery Removal & IDEV Build (PART 1). 2020. Verkkoaineisto. YouTube. All EV Canada. <https://www.youtube.com/watch?v=DPVrraVbEIM>. 20.2.2020. Katsottu 22.2.2021.

29 Tesla Battery Swap - Let's Shove A Model 3 Battery In A 1950 Jaguar. 2021. Verkkoaineisto. YouTube. SuperfastMatt. <https://www.youtube.com/watch?v=EAfnbG2UNzM>. 13.4.2021. Katsottu 16.4.2021.

30 Alvarez, Simon. 2019. Tesla Model 3 battery module replacements to cost $5k to $7k, says Elon Musk. Verkkoaineisto. Teslarati. <https://www.teslarati.com/tesla-model-3-battery-module-replacements-elon-musk/>. 14.4.2019. Luettu 26.2.2021.

31 Loveday, Eric. 2009. 2011 Nissan LEAF: Design Aimed at Mainstream Appeal. Verkkoaineisto. <https://www.greencarreports.com/news/1033843_2011-nissan-leaf-design-aimed-at-mainstream-appeal>. 3.8.2009. Luettu 18.5.2021.

32 Voelcker, John. 2016. Nissan Leaf S quietly gets 30-kwh battery upgrade, higher price. Verkkoaineisto. Green Car Reports. 16.11.2016. Luettu 21.5.2021.

33 Nissan Leaf 24kWh. Verkkoaineisto. Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org/car/1019/Nissan-Leaf-24-kWh>. Luettu 13.3.2021.

34 Maluf, Nadim. 2015. Inside the battery of a Nissan Leaf. Verkkoaineisto. Qnovo. <https://qnovo.com/inside-the-battery-of-a-nissan-leaf/>. 8.7.2015. Luettu 13.3.2021.

35 2011 Nissan LEAF Battery – Deep dive. 2019. Verkkoaineisto. YouTube. WeberAuto. <https://www.youtube.com/watch?v=vYQJatWpBXY>. 11.12.2019. Katsottu 14.3.2021.

36 Nissan Leaf Budget Battery Upgrade [ZE0, 24kWh-30kWh]. 2020. Verkkoaineisto. YouTube. Daniel Öster. <https://www.youtube.com/watch?v=1Dwsk9lnr6I&t=749s>. 20.10.2020. Katsottu 14.3.2021.

37 Taking apart a Nissan LEAF battery pack, part 1. 2015. Verkkoaineisto. YouTube. BenjaminNelson. <https://www.youtube.com/watch?v=h0dDHJKzX78>. 22.3.2015. Katsottu 15.3.2021.

38 Taking apart a Nissan LEAF battery pack, part 2. 2015. Verkkoaineisto. YouTube. BenjaminNelson. <https://www.youtube.com/watch?v=-z4o8y2RR2A>. 22.3.2015. Katsottu 15.3.2021.

39 Nissan LEAF Battery: Module tear-down Part 1. 2015. Verkkoaineisto. YouTube. BenjaminNelson. <https://www.youtube.com/watch?v=NrCiQRmGui0>. 1.4.2015. Katsottu 15.3.2021.

40 Nissan LEAF Battery: Module tear-down Part 2. 2015. Verkkoaineisto. YouTube. BenjaminNelson. <https://www.youtube.com/watch?v=aRhHIeEucro>. 1.4.2015. Katsottu 15.3.2021.

41 Leaf Spy Lite. Verkkoaineisto. Google Play Store. Turbo3. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.Turbo3.Leaf_Spy_Lite&hl=en&gl=US> Luettu 16.3.2021.

42 Services. Verkkoaineisto. Dala's EV Repair. <https://dalasevrepair.fi/> Luettu 16.3.2021.

43 A new life for your Nissan Leaf. Verkkoaineisto. EV Battery Rebuilds. Renovables del Sur. <https://evbatteryrebuilds.com/en/ev-battery-rebuilds-2-2/>. Luettu 16.4.2021.

44 Nissan Leaf akkuvaihto. Verkkoaineisto. Pistokehybridi.fi. <https://pistokehybridi.fi/nissan_leaf_akkuvaihto.html>. Luettu 16.3.2021.

45 Morlet, Nicolas. 2020. Renault Zoe: The story of the city car which revolutionized electric driving!. Verkkoaineisto. Groupe Renault. <https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/outlook/markets/renault-zoe-the-story-of-the-city-car-which-revolutionized-electric-driving/>. 15.6.2020. Luettu 22.5.2021.

46 Delobel, Bruno. 2017. ZOE Battery Durability, Field experience and Future Vision. Verkkoaineisto. Renault Battery Development Department. <http://cii-resource.com/cet/AABE-03-17/Presentations/BMGT/Delobel_Bruno.pdf>. Luettu 18.3.2021.

47 Lima, Pedro. 2019. Renault ZOE ZE 40 full battery specs. Verkkoaineisto. Push EVs. <https://pushevs.com/2019/02/10/renault-zoe-ze-40-full-battery-specs/>. 10.2.2019. Luettu 17.3.2021.

48 Renault Zoe Battery Disassembly- LG Chem Modules – DIY EV Powerwall Solar. 2020. Verkkoaineisto. YouTube. TopRock. <https://www.youtube.com/watch?v=YU_qfD582Sk>. 20.12.2020. Katsottu 17.3.2021.

49 Meijer, Jeroen. 2016. Zoe Battery. Verkkoaineisto. Google Drive. <https://drive.google.com/drive/folders/0B4k-iADFKit-TeUN6cVJ0RlhTRlE>. 2.2.2016. Luettu 18.3.2021.

50 Comment remplace t-on une batteria de Zoé ?. 2017. Verkkoaineisto. YouTube. Automobile-Propre.com. <https://www.youtube.com/watch?v=dbzW3HkU_RU>. 14.12.2017. Katsottu 18.3.2021.

51 Renaut Zoe 2018 Battery. Verkkoaineisto. Bildelbasen. <https://www.bildelsbasen.se/en-se/pb/Search/Car%20parts/s1/Renault/RENAULT-ZOE/_/Electric-&-Transmitter-&-Databox-&-Sensor/Battery/All/ID-43328545/295108557R>. Luettu 5.5.2021.

52 CanZE. Verkkoaineisto. Google Play Store. Bob Fisch. <https://play.google.com/store/apps/details?id=lu.fisch.canze&hl=en&gl=US>. Luettu 18.3.2021.

53 Press Release. Verkkoaineisto. Autoevolution. <https://www.autoevolution.com/cars/bmw-i3-2013.html#press>. Luettu 23.5.2021.

54 BMW i3 60 Ah. Verkkoaineisto. Electric Vehicle Database. <https://ev-database.org/car/1004/BMW-i3-60-Ah> Luettu 25.3.2021.

55 With new high-voltage batteries for an even further extended range and retaining characteristic BMW sporty flair: the BMW i3 (120 Ah) and the BMW i3s (120 Ah). 2018. Verkkoaineisto. BMW Group. <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0284828EN/with-new-high-voltage-batteries-for-an-even-further-extended-range-and-retaining-characteristic-bmw-sporty-flair:-the-bmw-i3-120-ah-and-the-bmw-i3s-120-ah>. 28.9.2018. Luettu 23.5.2021.

56 2017 BMW i3 will get 94 Ah battery cells from Samsung SDI. 2015. Verkkoaineisto. EVBud.com. chumakdenis. <http://evbud.com/news/818/>. 18.12.2015. Luettu 2.4.2021.

57 Schoewel, Florian & Hockgeiger, Elmar. 2014. The high voltage batteries of the BMW i3 an BMW i8. Verkkoaineisto. BMW Group. <https://wiki.aalto.fi/download/attachments/91692283/high_voltage_batteries_of_bmw_vehicles.pdf?version=1>. 3-7.2.2014. Luettu 2.4.2021.

58 BMW i3 Batterypack teardown. 2020. Verkkoaineisto. YouTube. persteel. <https://www.youtube.com/watch?v=la0zs9Oa4HM>. 16.9.2020. Katsottu 2.4.2021.

59 BMWi3 Battery Pack. 2015. Verkkoaineisto. YouTube. MunroAssoc. <https://www.youtube.com/watch?v=YZ9UpLkVJlo>. 4.2.2015. Katsottu 2.4.2021.

60 BMW i3 Battery Production. 2013. Verkkoaineisto. YouTube. Bimmerfest. <https://www.youtube.com/watch?v=iiJsKza5CF4>. 24.9.2013. Katsottu 2.4.2021.

61 BMW i3 60Ah Battery Pack Disassembly. 2019. Verkkoaineisto. YouTube. B as in Bjorn. <https://www.youtube.com/watch?v=LB6WI8cRzgs>. 15.12.2019. Katsottu 3.4.2021.

62 2014 bmw i3 battery cell removal. 2016. Verkkoaineisto. YouTube. gondesngaran. <https://www.youtube.com/watch?v=L6DVQnHQHPM>. 4.5.2016. Katsottu 3.4.2021.

63 BMW i3 120Ah battery upgrade – How to?. 2021. Verkkoaineisto. YouTube. Daniel Öster. <https://www.youtube.com/watch?v=EH02scyr-CaE>. 30.1.2021. Katsottu 3.4.2021.

64 BMW i3 Battery Pack Module Closeup. 2020. Verkkoaineisto. YouTube. B as in Bjorn. <https://www.youtube.com/watch?v=w61o8vPF9AY>. 4.3.2020. Katsottu 4.4.2021

65 Boeriu, Horatiu. 2015. Interview with BMW i USA on the i3 and X5 hybrid. Verkkoaineisto. BMWBlog. <https://www.bmwblog.com/2015/04/03/interview-with-bmw-i-usa-on-the-i3-and-x5-hybrid/>. 3.4.2015. Luettu 4.4.2021.

66 AC Condenser Damage – 2015 BMW i3 REX. 2016. Verkkoaineisto. My BMW i3.com. <https://www.mybmwi3.com/forum/viewtopic.php?t=5750>. 21.3.2016. Luettu 2.4.2021.

67 BMW i3 60 Ah REX 2015 akusto. Verkkoaineisto. Autopurkaamot.com. <https://www.autopurkaamot.com/naytaosa.php?id=1125674&osa=akusto,%20s%E4hk%F6ajoneuvon%20ajovoima-akusto&auto=BMW%20i3%2060Ah%20REX>. Luettu 10.3.2021.

68 BMW i3 60Ah REX 2015 moduuli. Verkkoaineisto. Autopurkaamot.com. <https://www.autopurkaamot.com/naytaosa.php?id=1125675&osa=ajovoima-akun+moduuli&auto=bmw+i3+60ah+rex+>. Luettu 10.3.2021.