

Sähköautot ja Satakunnan teknologiametalliklusteri

Prizztech Oy

Timo Santa-Nokki
Minna Haavisto
Jarkko Vuorela

15.4.2020



Lyhenteet	3
1. Johdanto	5
2. Sähköautojen voimalinjan kehitystrendit ja volyymit.....	6
2.1. Akku	6
2.1.1. Rakenne	6
2.1.2. Kennojen rakenne.....	6
2.1.2.1. Erottimet.....	7
2.1.2.2. Sylinterimäinen kenno	7
2.1.2.3. Prismaattinen kenno	8
2.1.2.4. Pussirakenteinen kenno.....	8
2.1.3. Akkupaketin rakenne.....	9
2.1.4. Akkukemia.....	11
2.1.4.1. Katodimateriaalit	11
2.1.4.2. Anodimateriaalit	13
2.1.4.3. Elektrolyytti.....	15
2.1.5. Akkumetallit.....	15
2.1.6. Akkutuotannon kustannukset	16
2.1.7. Akkukennovalmistajat.....	17
2.2. Moottorit	20
2.2.1. Sähkömoottorien tyypit	20
2.2.2. Sähkömoottorien materiaalit	23
2.3. Tehon muokkaus.....	23
2.3.1. Tehoelektronikka.....	23
2.3.2. Voimansiirto.....	25
3. Kehitystrendit ja volyymit teknologiametallien kysynnän kannalta	27
3.1. Akkukemian kehitys	27
3.2. Sähköautojen määrän kehitys.....	29
4. Primääri raaka-aineiden saatavuus ja metallien kierrätys.....	32
4.1. Akkumetallien varannot ja tuotanto	32
4.2. Akkumetallien riittävyys	34
5. Satakunnan teknologiametalliklusterin nykyiset liittynät sähköautoihin	36
5.1. Satakunnan teknologiametalliklusterin uusia mahdollisuuksia ja haasteita sähköautoliiketoiminnassa.....	37

6.	Yhteenveto ja johtopäätökset	39
7.	Lähteet.....	40
8.	Liitteet.....	46

Lyhenteet

Termi tai lyhenne	Määritelmä
BEV	(Battery electric vehicle) Sähköauto, joka saa energiansa vain ajoneuvon sisäisestä akusta. Sähköautossa yksi tai useampia sähkömoottoreita muuntaa akkuun varastoituneen energian liike-energiaksi.
PHEV	(Plug-in hybrid electric vehicle) Ladattava hybridiajoneuvo, jolla voidaan tyypillisesti ajaa lyhyitä matkoja (<50km) kuten sähköautoa. Akuston tyhjennystä ajoa voidaan jatkaa polttomoottorin, bensa tai diesel, avulla ja samalla ladata auton akustoa.
HEV	(Hybrid electric vehicle) Hybridiajoneuvo, jossa sähkömoottori ja pieni akusto tukevat polttomoottoria ja parantavat ajoneuvon hyötysuhdetta. Hybridiajoneuvoa ei yleisesti pysty ajamaan pelkällä sähköllä, mutta akuston koko vastaa tyypillisesti alle 10km:n ajosuoritetta.
ICE	Perinteinen polttomoottori
EV30@30	Kasvihuonekaasun vähentämiseen tähtäävä kampanja, jossa tavoitteena on, että vuonna 2030 myytävistä autoista 30% on sähköautoja.
CEM-EVI	The Clean Energy Ministerial – Electric Vehicle Initiative http://www.cleanenergyministerial.org/
C-luku	Akun kapasiteettiin verrannollinen lataus- tai purkuvirta. Esim. 1C vastaa 10Ah:n tunnin akulla 10A:n virtaa ja vastaavasti 20Ah:n akulla 20A:n virtaa.
LCE	Akuissa käytetään lukuisia litiumyhdisteitä, joten on yleistä viitata litium pitoisuuteen litiumkarbonaattiekvivalenttina ("LCE").
LFP	Katodityyppi: litiumrautafosfaatti ("LFP"), jonka kemiallinen kaava on LiFePO₄ .
LMO	Katodityyppi: litiummangaanioksidia ("LMO"), jonka kemiallinen kaava on LiMn₂O₄ .
LMO / LNO	Katodityyppi: sekoitus, jossa on 75% litiummangaanioksidia ("LMO") LiMn₂O₄ ja 25% litiumnikkelioksidia ("LNO") LiNiO₂ .
LMO / NCM	Katodityyppi: sekoitus, jossa on 75% litiummangaanioksidia ("LMO") LiMn₂O₄ ja 25% litiumnikkelikobolttimangaania ("NCM") Li[Ni_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}]O₂ .
NCA 80-15-05	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-alumiini ("NCA"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.80}Co_{0.15}Al_{0.05}]O₂ .
NCA 85-10-05	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-alumiini ("NCA"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.85}Co_{0.10}Al_{0.05}]O₂ .
NCA 87-07-06	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-alumiini ("NCA"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.87}Co_{0.07}Al_{0.06}]O₂ .
NCM 111	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-mangaani ("NCM"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}]O₂ .
NCM 523	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-mangaani ("NCM"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.50}Co_{0.20}Mn_{0.30}]O₂ .
NCM 622	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-mangaani ("NCM"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.60}Co_{0.20}Mn_{0.20}]O₂ .
NCM 811	Katodityyppi: litium-nikkeli-koboltti-mangaani ("NCM"), jonka kemiallinen kaava on Li[Ni_{0.80}Co_{0.10}Mn_{0.10}]O₂ .
NCM / LMO	Katodityyppi: sekoitus, jossa on 75% litiumnikkelikobolttimangaania ("NCM") Li[Ni_{0.33}Co_{0.33}Mn_{0.33}]O₂ ja 25% litiummangaanioksidia ("LMO") LiMn₂O₄ .
NiOH	Katodityyppi: nikkeli hydroksidi ("NiOH"), jonka kemiallinen kaava on NiOH, käytetään HEV:ien NiMH-akuissa
LTO	Anodityyppi: litiumtitaanioksidi ("LTO"), jonka kemiallinen kaava on Li₄Ti₅O₁₂ .
C6	Anodityyppi: grafiitti ("C6"), jonka kemiallinen kaava on C₆ .
AB5	Anodityyppi: AB5 seos ("AB5"), jossa A= La_{0.50}Ce_{0.35}Nd_{0.12}Pr_{0.03} ja B5 = Ni_{3.55}Co_{0.75}Mn_{0.40}Al_{0.30} , käytetään HEV:ien NiMH-akuissa
SCiB-akku	Toshiban korkeisiin kuormitusvirtoihin kykenevä akkumalli (Super Charge ion Battery)

SOC	Akun varaustila (State Of Charge)
LV- ja HV-johdin	Autoissa käytettävät 12V:n matalajännitteiset Low Voltage-johtimet ja yli 12V:n jännitteelle suunnitellut High Voltage-johtimet
EUR	Euro, käytetään myös merk. €
USD	Yhdysvaltain dollari, myös merk. \$
CNY	Kiinan yuan

1. Johdanto

Yhteiskunnan ja liikkumisen sähköistyminen on 2000-luvun megatrendi, joka muuttaa voimakkaasti perinteistä autoteollisuutta. Polttomoottorista sähkömoottoriin siirtyminen hävittää perinteisiä polttomoottoreita ja vaihteistoja valmistavia konepajoja, mutta luo samalla uutta sähkökoneosaamista ja erityisesti akkuvalmistusteknologiaa.

Autoteollisuus ei ole katoamassa. Maailmassa on reilusti yli miljardi autoa ja uusia valmistetaan vuosittain noin 100 miljoonaa kappaletta. Valmistusmäärät ovat jatkuvasti kasvamassa. Väestön kasvu ja erityisesti Aasian keskiluokan vaurastuminen kiihdyttävät uusien autojen valmistusta.

Samaan aikaan ilmaston muutoksen torjunta edellyttää voimakkaita päästövähennyksiä ja erityisesti fossiilisista polttoaineista luopumista ja siirtymistä kohti kestävästi tuotettuja energianlähteitä. Siirtyminen sähkön käyttöön ajoneuvojen voiman lähteenä nähdään kaikkein ilmastoystävällisimpänä muutoksena.

Vuonna 2017 käynnistetyn kansainvälisen EV30@30 kampanjan tavoitteena on kasvattaa sähköautojen markkinaosuus 30 prosenttiin uusien autojen myynnistä vuoteen 2030 mennessä. Kampanjaa organisoivat CEM-EVI (The Clean Energy Ministerial – Electric Vehicle Initiative) ja Suomi on sitoutunut mukaan kampanjaan Kanadan, Kiinan, Ranskan, Intian, Japanin, Meksikon, Alankomaiden, Norjan ja Ruotsin kanssa. [1]

Globaalisti sähköautojen, joihin luetaan tällä hetkellä kuuluvaksi niin hybridit, plug-in hybridit kuin täyssähköautotkin, markkinaosuus oli vain vähän yli 2 % vuonna 2018. Markkinaosuus kasvaa lähes kaikkialla, mutta muutosvauhti on kovin erilaista eri maissa. Tavoite kasvattaa sähköautojen markkinaosuus lähes kolmannekseen kymmenessä vuodessa asettaa suuria vaatimuksia teknologian mahdollistavien metallien tuotannon kasvattamiselle. Näitä teknologiametalleja jalostetaan Satakunnassa. Sähköautojen kehitystrendit vaikuttavat siten merkittävästi myös satakuntalaiseen teknologiametalliklusteriin luoden mahdollisuuksia uudelle liiketoiminnalle.

Tämä Sähköautot ja Satakunnan teknologiametalliklusteri-selvitys on tuotettu osana Satakuntaliiton EAKR-rahoituksella rahoittamaa Kriittisten kierrätysmetallien koetehdaskonsepti-hanketta. Selvitystä varten on kerätty kirjallista tietoa sekä haastateltu alalla toimivien yritysten edustajia.

Selvityksessä tarkastellaan sähköautoteknologian kehityssuuntia ja niiden vaikutuksia teknologiametallien kysyntään. Tarkoituksena on hahmottaa yhteiskunnan sähköistymisen myötä satakuntalaiselle teknologiametalliklusterille avautuvia uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Erityisen suuri uusi liiketoimintapotentiaali liittyy akkujen valmistukseen.

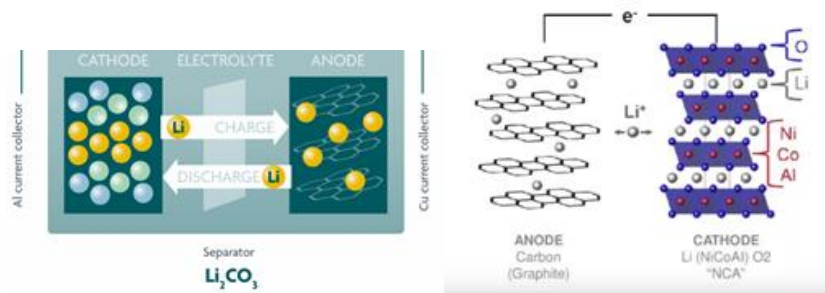
2. Sähköautojen voimalinjan kehitystrendit ja volyymit

2.1. Akku

2.1.1. Rakenne

Sähköauton käyttöenergia on varastoitu kemiallisesti akun elektrodien välille. Elektrodien välinen jännite vastaa akun sähkömotorista voimaa. Elektrodeilla tapahtuvat hapettumis- ja pelkistymisreaktiot saavat aikaan sähkövirran. Akun jännitteen ja sähkövirran tulo on akustosta ulos otettava teho.

Akun purkautuessa katodilla tapahtuu pelkistysreaktio ja anodilla hapettumisreaktio. Akkua voidaan myös ladata sähkövirralla, jolloin elektrodeilla tapahtuvat vastakkaiset reaktiot.



Kuva 2.1-1 Litiumioniakun periaatekuva [2] [3]

Yllä olevassa kuvassa 2.1-1 on esitetty sähköautoissa tyypillisesti käytetyn litiumioniakun (LIB) periaatekuva. Katodimateriaali perustuu tyypillisesti erilaisiin litiummetallioksidiin, kun taas anodimateriaalina käytetään usein grafiittia. Näiden välissä on eriste, joka sallii nestemäisessä elektrolyytissä varauksenkuljettajina toimivien Li^+ -ionin liikkumisen, mutta samalla eristää katodin ja anodin toisistaan.

Katodi- ja anodimateriaalien kemiasta johtuen virranjohtimena katodilla käytetään tavallisesti alumiinia ja anodilla kuparia.

2.1.2. Kennojen rakenne

Litiumioniakkujen kennoissa käytetään yleisesti kolmea erilaista rakennetta: sylinteri, prismaattinen ja pussirakenne. Näistä valitaan sopiva käyttökohteen mukaan. Sylinterinmalliset akut ovat tyypillisesti sormipariston kaltaisia (AA, AAA, 18650 jne.). 18650-mallissa akussa kaksi ensimmäistä numeroa vastaavat akun halkaisijaa eli tässä tapauksessa $D=18\text{mm}$. Kolme viimeistä numeroa vastaavat sylinterimäisen akun pituutta eli $H=65,0\text{mm}$.

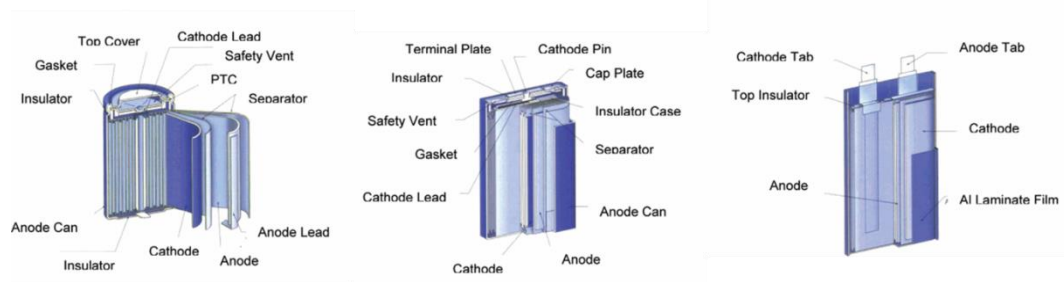
Prismaattisten akkujen tunnusomainen muoto on suorakulmio, jonka koko vaihtelee. Tätä akkumallia löytyy esimerkiksi puhelimista, tableteista ja joistakin kannettavista tietokoneista. Pussimallisia kennoja käytetään useimmiten ajoneuvoissa niiden kompaktiuden ja keveyden vuoksi.

Pussimallisessa kennossa elektrodit ja eristelevyt ovat leikattu arkeiksi, jotka on ladottu päällekkäin.

Prismaattisessa kennossa elektrodien ja eristeiden rakenne voi olla samankaltainen kuin sylinterimäisessä,

mutta kenno on puristettu litteäksi, lähemmäksi suorakulmaista muotoa ympyrän sijaan. Pussimaisella ja prismaattisella kennomuodolla voidaan saavuttaa sylinterimäistä muotoa suurempi pakkaustiheys.

Pussimainen ja prismaattinen kenno ovat kuitenkin herkempiä elektrodien delaminoitumiselle, mikä heikentää akun toimintaa. Tämän vuoksi näille kennoille on tyypillisestä, että ulkokuori pitää elektrodit puristuksen alaisena ja estää kennojen turpoamista.



Kuva 2.1-2 Akkukennojen tyypillisimmät rakenteet [4]

2.1.2.1. Erottimet

Erottimen tehtävänä on eristää positiiviset ja negatiiviset elektrodit toisistaan, mutta kuitenkin samalla päästää varauksenkuljettajina toimivat litiumionit lävitsensä. Erotin materiaalin paksuus on tyypillisesti suuruusluokkaa 20µm. Nykyaikaisessa Li-kennossa erotin ja elektrolyytti muodostavat yhdessä noin 3% koko kennon tilavuudesta. Erotin materiaaleina on tyypillisesti käytetty esim. nylonia, polyeteeniä tai polypropeenä. [5] [6]

2.1.2.2. Sylinterimäinen kenno

Sylinterimäiset kennot muodostuvat metallisesta ulkokuoresta, jonka sisällä ovat rullattuina katodi, erotin ja anodi sekä tyypillisesti nestemäinen elektrolyytti.

Sylinterimäisen kennon toisessa päädyssä on negatiivinen (anodi) ja toisessa positiivinen (katodi) napa. Sylinterimäiset kennot kestävät erittäin hyvin niin ulkoista fyysistä rasitusta kuin myös sisäistä painetta, mikä ehkäisee delaminoitumista ja akun eliniän heikentymistä. Sylinterimäiset akut eivät yleensä turpoa, mutta niissä on turvallisuuden vuoksi ylipaineventtiili. Joissakin malleissa venttiili sulkeutuu uudestaan, kun paine on purkautunut, mutta useimmissa malleissa venttiili toimii samalla kertakäyttöisenä sähköisenä sulakkeena. Venttiilin lauetessa kennosta voi vuotaa nestettä, elektrolyyttiä, jolloin akku voi kuivua joko osittain tai kokonaan. Tämän jälkeen akku joko ei toimi tai sen toiminta on oleellisesti heikentynyt.

Osassa sylinterin mallisista akuista on myös PTC-kytkin eli positive thermal coefficient switch, joka akun liiallisen kuumenemisen myötä siirtyy johtamattomaan tilaan. Kuumeneminen voi johtua laitteesta olevasta oikosulusta, jolloin kennon luovuttama virta nousee liian suureksi, tai liian suuresta lataus- tai purkuvirrasta. Kun kenno on jäähtynyt tarpeeksi, siirtyy PTC-kytkin jälleen johtavaan tilaan. Kaikissa sylinterin mallisissa akuissa ei kuitenkaan ole tätä PTC-kytkintä. Näissä kennoissa on monesti maininta "ei

suojattu” ja kennot voi usein tunnistaa siitä, ettei niissä ole positiivisessa navassa alkaliparistoista (kuten perinteiset AA ja AAA patterit) tuttua kohoumaa.

2.1.2.3. Prismaattinen kenno

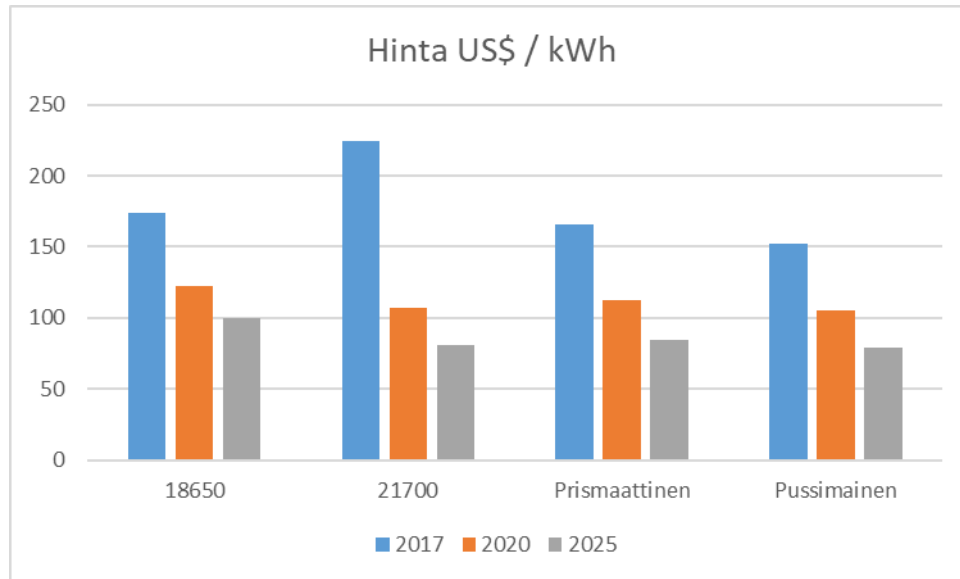
Prismaattiset kennot ovat sisällöltään hyvin samankaltaisia kuin sylinterin malliset, mutta sisusmateriaalit ovat puristettu tai kerrostettu laatikkomaiseen muotoon. Kennot ovat usein ohuita paketteja, jotka ovat suunniteltu suoraan johonkin laitteeseen sopivaksi. Tämä on harvemmin henkilöajoneuvoissa käytetty rakennemuoto, mutta on olemassa myös isompia ajoneuvokäyttöön valmistettuja akkuja. Näitä käytetään yleisesti raskaassa kalustossa. Ajoneuvokäytössä olevat prismaattiset kennot ovat usein hitsattuun alumiinikoteloon tehtyjä paketteja.

Yleisin käyttökohde prismaattisille kennoille ovat kannettava elektroniikka, kuten tietokoneet, tabletit ja puhelimet. Prismaattinen kennorakenne sallii jokseenkin hyvin akun turpoamisen kahden isomman kyljen ansiosta. Esimerkiksi kännyköistä voi löytyä noin viiden millimetrin paksuisia kennoja, joille on normaalia turvota jopa kahdeksan millimetriseksi 500 syklin jälkeen eli kennolle on normaalia turvota jopa 60 %. Tässä vaiheessa tosin kenno on kuitenkin jo delaminoitunut ja sen kapasiteetti pienentynyt huomattavasti. Monissa matkapuhelimeissa ja muissa päivittäisissä elektroniikkalaitteissa (tabletit, kannettavat tietokoneet jne.) kenno on kuitenkin koteloitu muoviin, jolloin sillä on jonkin verran kompressiota pitämässä laminointia kasassa. Tärkeintä turpoamisessa on huomioida, ettei akku turvottuaan paina itse laitteen elektroniikkaa, kuten näyttöä. Turvonneeseen akkuun liittyy kuitenkin räjähdysvaara, minkä vuoksi se tulisi poistaa käytöstä.

2.1.2.4. Pussirakenteinen kenno

Pussirakenteinen kenno edustaa Li-ionikennojen uusinta rakennetta. Kennorakenne julkaistiin vuonna 1995 ja ne ovat aiempiin rakenteisiin nähden keveitä ja tilanhallinnan kannalta erittäin hyviä. Pussirakenteiset kennot ovat todella suosittuja ratkaisuja ajoneuvokäytössä, sillä akkupaketit saattavat painaa useita satoja kiloja. Pussimaisella kennolla voidaan saavuttaa jopa 20 %:n painohyöty verrattuna sylinterimallisiin ja prismaattisiin kennoihin. Pussimaisilla kennoilla ei ole standardoitua kokoluokittelua vaan jokainen valmistaja tekee omanlaisia.

Alla olevassa kuvassa 2.1-3 on esitetty sylinterimäisten 18650 ja 21700, prismaattisten ja pussimaisten kennojen hintakehitystä. Hinnoissa ei ole akuston hallintaelektroniikan eikä akkupaketin kustannuksia. Sylinterimäisten kennojen tapauksessa kennon tilavuuden kasvu kasvattaa aktiivisten materiaalien osuutta ja sitä myöden alentaa kustannusta energiayksikköä kohden. Sylinterimäisen 18650 kennon halkaisija on 18 mm ja pituus 65 mm. Vastaavasti 21700 kennon halkaisija ja pituus ovat 21 mm ja 70 mm. [7]

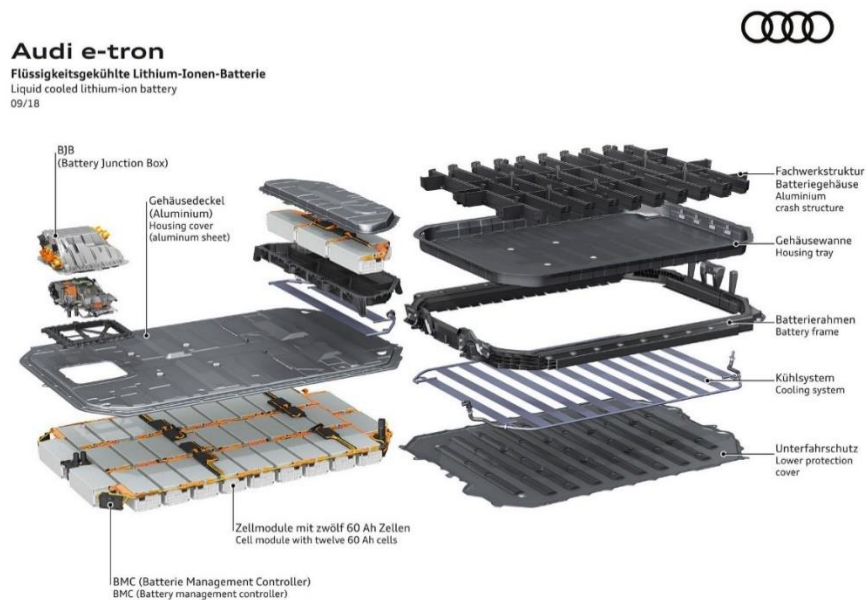


Kuva 2.1-3 Erilaisten kennorakenteiden kustannusarvio [7]

2.1.3. Akkupaketin rakenne

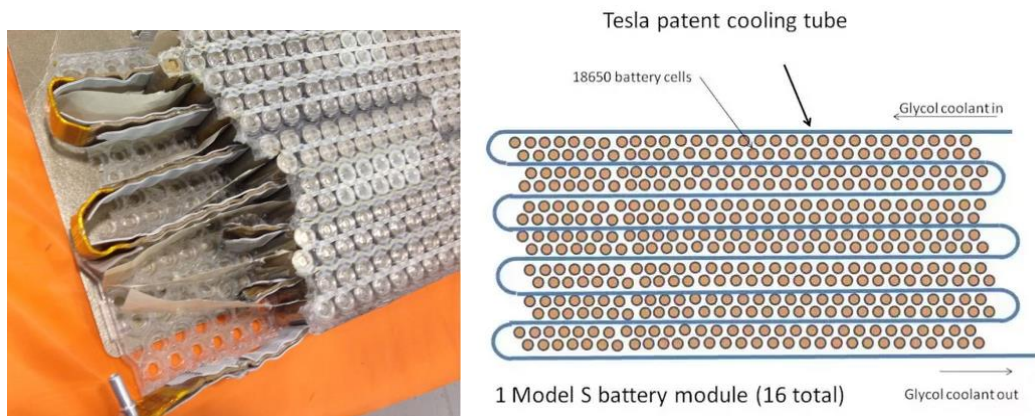
Sähköauton akkupaketti koostuu akkumoduuleista tukirakenteista, jäähdytysjärjestelmästä sekä sähköisestä kytkentäjärjestelmästä. Yksittäinen akkumoduuli sisältää useita akkukennoja, näiden sähköisen kytkentä- ja varaustilajärjestelmän sekä yksittäisten kennojen suojausjärjestelmät ylikuumenemista ja oikosulkua vastaan. Akkua purettaessa tai ladattaessa akkukennoissa syntyy lämpöä kennojen sisäisen resistanssin takia ja tämä lämpö pyritään poistamaan jäähdytysjärjestelmän avulla.

Alla olevassa kuvassa 2.1-4 on esitelty Audi e-tron mallin akkupaketin rakennetta. Pohjalevyn ja akkumoduulien alustan välissä on akkupaketin jäähdytysjärjestelmä. Tässä tapauksessa jäähdytyspiiri jäähdyttää akkumoduulien alustaa ja sitä kautta kennomoduulien ulkokuorta ja kennoja.



Kuva 2.1-4 Audi e-tron mallin akkupaketin rakenne [8]

Kuvassa 2.1-5 on esitetty Teslan jäähdytysratkaisua, jossa jäähdytyspiiri on tuotu lähemmäs sylinterimäisiä kennoja. Akkujen jäähdytyksellä on merkittävä vaikutus akkujen elinikään. Ensimmäisissä Nissan Leaf sähköautoissa ei ollut lainkaan jäähdytystä. Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin, missä iässä Nissan Leafin 24 kWh akun kapasiteetti on heikentynyt kolmanneksen alkuperäisestä. Helteisessä Floridassa tämän todettiin tapahtuvan jo viiden vuoden iässä, kun taas Alaskassa sama akku kesti 13 vuotta. [9]



Kuva 2.1-5 Teslan akkumodulin jäähdytys [10]

Useimmissa sähköautoissa akustoissa on aktiivinen nestejäähdytys. Nissan Leaf mallissa on passiivinen pakotettuun ilmajäähdytykseen perustuva ratkaisu. Nissan NV200 pakettiautossa on myös ilmajäähdytys, mutta puhallusilma on yhdistetty ajoneuvon ilmastointijärjestelmään.

Li-akkujen lataus-purku hyötysuhde on tyypillisesti suuruusluokkaa 80-90 %. Kennojen lämpenemisen kannalta suurteholataus on useimmiten ongelmallisempi kuin maksimi tehon ulosotto. Tehokkaimmat pikalatausasemat pystyvät lataamaan n. 150 kW:n teholla, jolloin akuston on pystyttävä noin 30 kW:n jäähdystystehoon useiden minuuttien ajan. Teslan tehokkaimman S-mallin moottoreiden yhteisteho on 515 kW, mutta tästä vain 345 kW pystytään hetkellisesti ulosmittaamaan. Kyseisen mallin moottorinohjaus sallii kennojen hetkellisen lämpötilan nousun, mutta kuormitus aika on kuitenkin merkittävästi lyhempi kuin pikalataustilanteessa. [11] [12]

2.1.4. Akkukemia

Akkukemialla tarkoitetaan katodi- ja anodimateriaalien ja niiden välisen elektrolyytin kemiallista koostumusta, jolla aikaansaadaan sähkövirta napojen väliin tiettyjen kemiallisten reaktioiden avulla. Akkutyypeistä käytetään usein joko katodi- tai anodimateriaalina käytetyn yhdisteen nimeä. Kuvassa 2.1-6 on esitetty tarkasteltavien akkukemioiden ominaisuuskuvaajat.

2.1.4.1. Katodimateriaalit

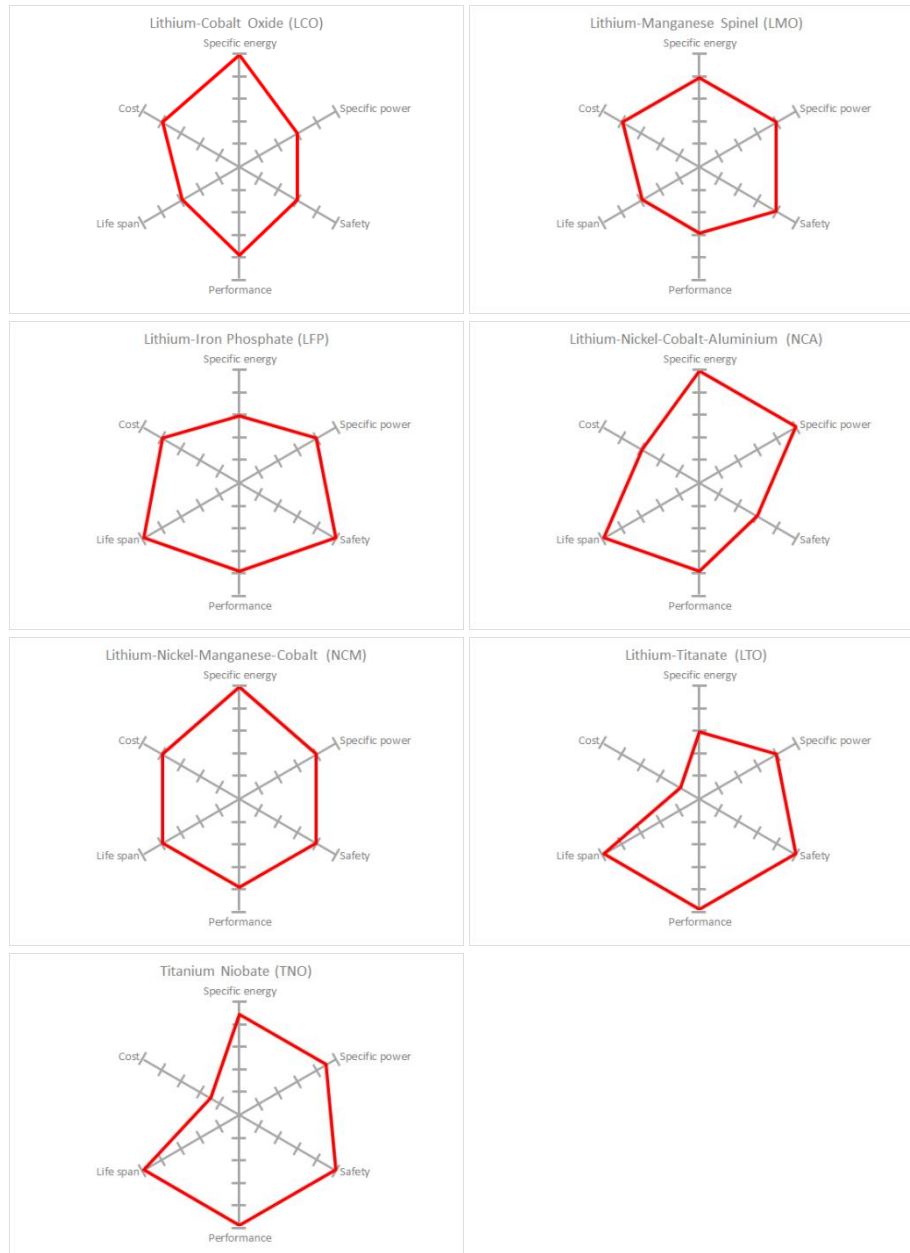
Litiumkobolttioksidi, LCO

Litiumkobolttioksidin, LCO tai LiCoO_2 , hyviä ominaisuuksia ovat hyvä energianvarastointikyky (150-200 Wh/kg) ja suhteellisen edullinen hinta. Huonoja puolia ovat suhteellisen lyhyt sykli-ikä (n. 500-1000 sykliä), huono lämpötasapaino ja melko heikko kyky vastaanottaa ja luovuttaa energiaa. LCO:a on käytetty enimmäkseen hyvän energianvarastointikykyä vuoksi puhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja kameroissa. LCO-materiaali on kehitetty vuonna 1991. Nykyään LCO:ta on alettu korvaamaan uudemmilla yhdisteillä.

Litiummangaanioksidi, LMO

Litiummangaanioksidi, LMO tai LiMn_2O_4 , on kehitetty vuonna 1996. Sitä käytettiin ensimmäisissä sähköautoissa, kuten Nissan Leaf:ssä suhteellisen alhaisesta hinnasta ja korkeasta luotettavuudesta johtuen. Nykyään sen pääasiallinen käyttökohde on sähkötyökaluissa. LMO:n heikkouksia ovat alhainen sykli-ikä (n. 300-700 sykliä) sekä melko alhainen energiatiheys (100-150 Wh/kg).

Ajoneuvokäytössä LMO on jo suurelta osin korvattu uudemmilla NCM ja NCA yhdisteillä, joilla saavutetaan selvästi LMO:a paremmat ominaisuudet. LMO:a käytetään kuitenkin vielä sen hyvän tehon ja turvallisuuden vuoksi. Hyvän purkutehon (jopa 10 C) takia LMO katodimateriaalia käytetään esimerkiksi sähköajoneuvoissa auttamaan akustoa kiihdyttämiseen vaadittavissa ominaisuuksissa, vaikka suurin osa katodimateriaalista perustuukin esimerkiksi litiumkobolttimangaanioksidiin (NCM). Tällöin akkukemiasta käytetään merkintää NCM/LMO, jossa NCM ja LMO yhdisteet ovat kemiallisesti sekoitettu yhteen. NCM/LMO-katodia käytetään esimerkiksi BMW i3:ssa, Chevrolet Voltissa ja Nissan Leafissa. Näiden ajoneuvojen akkujen katodit koostuvat noin 30-prosenttisesti LMO:sta. BMW i3 on mainituista ajoneuvoista vielä varsin uusi malli, joten LMO:lla on todennäköisesti vielä annettavaa ajoneuvokäytössä, vaikka se on jo osin korvattu monissa sovelluksissa muilla yhdisteillä. [13] [14]



Kuva 2.1-6 Eri akkukemioiden ominaisuuskuvaajat. [2] [13]

Litiumrautafosfaatti, LFP

Litiumrautafosfaatti-, LFP- tai LiFePO_4 -kennot on kehitetty vuonna 1996. LFP-kennot ovat ominaisuuksiltaan turvallisia, mutta niiden energiatiheys ja virran luovutus- ja vastaanottokyky vaihtelevat suuresti riippuen siitä, onko kenno teho- vai energiaoptimoitu. Etuja ovat usein pitkä käyttöikä (n. 1000–2000 sykliä), erittäin hyvät lämpöominaisuudet, ylikuormituksenkestävyys ja hyvä käyttöturvallisuus. LFP akkuja voidaan pitää täyteen ladattuna pitkiäkin aikoja suorituskvyn kärsimättä erityisemmin. Tällä akkutyypillä on matala sisäinen impedanssi ja tasainen käyttöjännite, jotka ovat hyviä ominaisuuksia kennolle. LFP sietää kuitenkin huonosti kylmiä oloja. LFP-kennojen energiatiheys (90–120 Wh/kg) on

NCM-kennoihin verrattuna noin 15–20 % pienempi. Sopivimpia käyttökohteita ovat yleensä varavoimapaketit ja lyijykäynnistysakkujen korvaaminen erittäin suuren virran luovutuskykynsä vuoksi. LFP on yleinen myös EV- ja PHEV-käytössä erityisesti linja-autoissa ja energiavarastoissa.

Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi, NCA

Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi, NCA tai LiNiCoAlO_2 , on kehitetty vuonna 1999 ja on jatkoa litiumnikkelioksidille, missä alumiini tarjoaa paremman vakauden NCA-yhdisteelle. NCA on samankaltainen kuin NCM tarjoten suuren kapasiteetin (200–260 Wh/kg) ja suhteellisen hyvän tehon (1 C). NCA ei ole erityisen vakaa (sykli-ikä on noin 500 sykliä) tai edullinen vaihtoehto koboltin korkean hinnan vuoksi. Tesla käyttää ajoneuvoissaan NCA-tyyppin kennoja. Vuonna 2015 Teslan osuus valmistetuista 18650-kennoista oli noin neljännes, mikä on nostanut NCA-kennojen tuotannon tarvetta oleellisesti. Vuonna 2019 Tesla/ Panasonic on maailman merkittävin kennovalmistaja. [15] [13]

Litiumkobolttimangaanioksidi, NCM

Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi, NCM tai LiNiCoMnO_2 , on kehitetty vuonna 2008 ja se on yksi parhaista tämän hetken litiumyhdisteistä. NCM kykenee tarjoamaan kohtalaisen suuren kapasiteetin (150–220 Wh/kg) ja suuren purkuvirran (1–2 C) tehden siitä erittäin monikäyttöisen. Vielä vuonna 2014 tyypillisin NCM-yhdistelmä oli niin kutsuttu 1-1-1, jossa kaikkia alkuaineita on yhtä paljon. Koboltin määrää yhdisteessä on kuitenkin pyritty määrätietoisesti vähentämään sen korkean hinnan vuoksi. Toisaalta koboltti stabiloi NCM-yhdistettä ja vaikuttaa positiivisesti kennon sykli-ikäen, joka on tyypillisesti 1000–2000 sykliä. Kobolttia vähennetään pääasiassa nikkelpitoisuutta lisäämällä. Vuonna 2019 valmistettavissa NCM yhdisteissä yleisimmät seossuhteet olivat 5-2-3 ja 6-2-2. Vuoden 2019 lopussa uusimpana yhdisteenä tuli NCM811, jossa nikkelin, koboltin ja mangaanin seossuhteet ovat 8-1-1. NCM akuista käytetään myös merkintää NMC, mutta tällöin seossuhteita kuvaavat numerot pitää esittää metalleja vastaavassa järjestyksessä.

Toimintaperiaate tämän yhdisteen takana on se, että nikkelillä on hyvä energian varastointikyky, mutta se on kovin epävakaa aine yksinään. Mangaanilla taas on huono kyky varastoida energiaa, mutta se on hyvin vakaa. Mangaanin vuoksi akkukemialla on myös erittäin matala sisäinen impedanssi. Yhdistettynä nikkeli ja mangaani toimivat toisiaan tukevina aineina. Lisäksi anodin pohjana voidaan käyttää piitä, jolloin saadaan aikaiseksi vielä parempi energianvarastointikyky. Tällöin kuitenkin huononnetaan akun elinikää ja akusta tulee epävakampi. NCM on erittäin käytetty yhdiste litiumakuissa ja sitä käytetään lähes kaikkialla kuten esimerkiksi työkaluissa, polkupyörissä ja ajoneuvoissa. Energiaoptimoiduilla kennoilla elinikäkin on erittäin hyvä.

2.1.4.2. Anodimateriaalit

Grafiitti + Si

Litiumioniakkujen yleisin anodimateriaali on grafiitti. Grafiitin pii-seostuksella voidaan akun kapasiteettia kasvattaa, koska pii kykenee sitomaan samaan tilavuuteen kymmenkertaisen energiamäärän grafiittiin verrattuna. Haittapuolena pii laajenee täyteen ladatussa akussa 3–4 kertaiseksi, joten käytännössä pelkästään piistä valmistettu anodi ei ole mahdollinen. Grafiitti laajenee täyteen ladatussa akussa n. 10%. [16]

Taulukko 2.1-A Teslan käyttämät akkumallit ja grafiittipitoisuus [16]

Tesla NCA	2009-2015	2016-2018	2018-
Akkukennon tyyppi	18650	18650	21700
Anodi	grafiitti	grafiitti + Si (10-15%)	grafiitti + Si (> 15%)
Hinta / kWh	\$300-500/kWh	n. \$200/kWh	alle \$100/kWh

Litiumtitanaattioksidi, LTO

Litiumtitanaattioksidi, LTO tai $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ on tullut markkinoille vuonna 2008 ja tarjoaa todennäköisesti eliniältään, suorituskyvyltään ja turvallisuudeltaan parhaan litiumkemian. LTO anodimateriaalin parina käytetään tavallisesti joko LMO tai NCM katodimateriaalia. Sykli-ikä LTO-kennolla on huomattavasti pitempi kuin muilla kestävinä pidetyillä litiumyhdisteillä: 3000–7000 sykliä, jopa yli 10 000 sykliä. Parhaimmillaan LTO toimii alhaisessakin lämpötilassa saavuttaen jopa -30°C :ssa 80 % maksimikapasiteetista, mikä on erittäin hyviä verrattuna muihin kennoihin, jotka menettävät usein paljonkin kapasiteettiaan kylmässä. Lisäksi useimmat kennot menettävät virran luovutuskykyään kylmissä oloissa, sillä niiden sisäinen impedanssi kasvaa liian suureksi, eikä akku ole enää kovinkaan käyttökelpoinen.

LTO:n etu on erittäin matala sisäinen impedanssi, josta seuraa sen hyvä kyky luovuttaa (jopa 10 C) ja vastaanottaa (1-5 C) energiaa. Näiden ominaisuuksiensa vuoksi LTO on ajoneuvokäyttöön hyvä vaihtoehto, sillä se kykenee tarjoamaan ajoneuvoilta vaadittuja ominaisuuksia, kiihdyttämiseen vaadittua virran luovutuskykyä, pitkää elinikää sykleinä mitattaessa ja pikalatauksen, joka lyhentää latauspisteellä vietettyä aikaa lähemmäs polttomoottorilla varustettujen ajoneuvojen tankkausaikaa.

Suurin LTO:n heikkous on suhteellisen pieni kapasiteetti, joka on noin 70–80 Wh/kg. Eri lähteissä on annettu hieman erilaisia arvoja kapasiteetille. Mikäli kapasiteetti olisi suurempi, se tasapainottaisi hieman kennon hintaa. Pieni kapasiteetti aiheuttaa kuitenkin sen, että LTO on kovin raskas vaihtoehto akuksi, mikäli sillä halutaan saavuttaa vastaavia ajoetäisyyksiä kuin esimerkiksi NCA grafiitti-pii seosteilla akuilla.

Yleisiä LTO-akkujen käyttökohteita ovat varavoima-akustot sähkökatkokkien varalle ja EV-ajokut. Ajoneuvoja, joissa LTO-kennoja on käytetty ainakin ajoakkuina, ovat Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV ja Metropolian ERA. Lisäksi LTO-akkuja käytetään joissakin elektroniikkalaitteissa, kuten Toshiba kannettavassa tietokoneessa SCiB-akkuina (Super Charge ion Battery) ja Seikon kineettisissä kelloissa kondensaattorin sijasta. [15] [17]

Titaaniniobaatti, TNO

Titaaniniobaatti-anodilla voidaan saavuttaa korkeat purku- ja latausvirrat, pitkä sykli-ikä sekä kaksinkertainen energiakapasiteetti LTO-anodimateriaalin verrattuna. Toshiba kehittämät toisen sukupolven SCiB-akut perustuvat tähän anodimateriaaliin.

Nb dopauksella voidaan parantaa myös esimerkiksi LFP-katodimateriaalin sähkönjohtavuutta jopa 10^9 kertaisesti. Toisaalta LiNbO_3 pinnoitteella voidaan parantaa merkittävästi akun lataus- ja purkunopeutta, alentaa varauksen siirtoresistanssia sekä parantaa akun turvallisuutta ja elinikää. [18] [19] [20] [21]

2.1.4.3. Elektrolyytti

Litiumioniakuissa nestemäisenä elektrolyyttinä käytetään vedettömiä seoksia litiumin reaktiivisuuden takia. Tavallisesti nämä elektrolyytit koostuvat litium suoloista, kuten esim. litiumheksafluorifosfaattista (LiPF_6), ja orgaanisesta liuottimesta, kuten etyleeni- tai dimetyylikarbonaattista. [5] [22]

Kiinteitä, pääasiassa keraamisia litiumoksidiin perustuvia elektrolyyttejä kehitetään parasta aikaa. Kiinteiden elektrolyyttien suurimpana etuna on turvallisuus, koska nestemäisistä elektrolyyteistä poiketen niissä ei ole elektrolyytin vuotoriskiä. Solid-state-kennojen luvataan kaksinkertaistavan energiakapasiteetin, mutta alhainen latausteho ja heikko suorituskky matalissa lämpötiloissa tekee niistä heikommin ajoneuvokäyttöön soveltuvia. Solid-state-kennot saattavat tulla kaupallisesti saataville vuosina 2020-2025. [23]

Toyotan on arveltu esittelevän kiinteään elektrolyyttiin perustuvan kennon Tokion olympialaisten aikaan vuonna 2020.

2.1.5. Akkumetallit

Vuonna 2019 yleisin sähköautojen akkukemia oli NCM-katodi grafiittianodilla. NCM622-katodimateriaalin kemiallinen koostumus on $\text{Li}[\text{Ni}_{0.60}\text{Co}_{0.20}\text{Mn}_{0.20}]\text{O}_2$, missä luvut 6, 2 ja 2 kuvaavat nikkelin, kobolttin ja mangaanin määrää suhteessa litiumiin. Akkukennossa litiumia on myös elektrolyytissä, mutta yli kymmenen kertaa kevyempänä metallina sen massaosuus kennossa jää pelko pieneksi.

Uusimman, kolmannen sukupolven NCA-katodimateriaalin kemiallinen koostumus on $\text{Li}[\text{Ni}_{0.87}\text{Co}_{0.07}\text{Al}_{0.06}]\text{O}_2$, jossa oleellisesti vain mangaani on korvattu alumiinilla. NCA:n koostumuksesta voidaan myös helposti havaita, että siinä käytetään 30% vähemmän kobolttia kuin vuonna 2019 markkinoille tullessa NCM811-katodimateriaalissa.

Anodimateriaalina kummassakin kilpailevassa akkukemiassa käytetään tyypillisesti hiiltä, grafiittia, johon on seostettu piitä varauskapasiteetin kasvattamiseksi. Molemmat anodilla käytetyt alkuaineet ovat siis hyvin yleisiä.

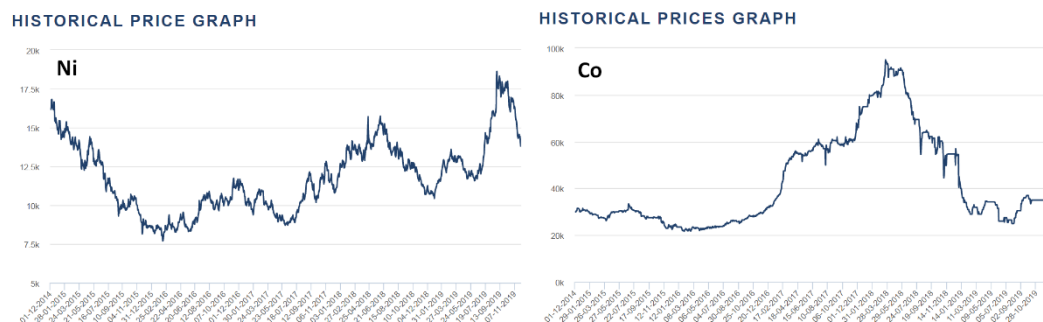
Aktiivisten materiaalien lisäksi katodilla ja anodilla käytetään sähkövirran kuljettamiseen alumiini- ja kuparifoliojohteita. Alumiinia käytetään yleisesti myös kennojen ja akkumoduulien kuorirakenteena edullisen hinnan ja keveyden vuoksi.

Alla olevissa kuvaajissa on esitelty akkumetallien hinnan kehitystä viimeisen viiden vuoden ajalta. Mangaanin osalta hinta on esitetty yksiköissä CNY/tn Tianjin satamassa Pohjois-Kiinassa. Litiumtuotteiden hinnan kehitys on kuvattu indeksikuvaajana. [24] [25]



Kuva 2.1-7 Yllä olevissa kuvaajissa on esitetty Mn ja Li hinnan kehitystä viimeisimmän viiden vuoden ajalta. [24] [25]

Nikkelin ja koboltin osalta on käytetty LME:n (London Metal Exchange) virallista hintakehitystä.



Kuva 2.1-8 Yllä olevissa kuvissa on esitetty Ni ja Co hinta (USD/tn) viimeisimmän viiden vuoden ajalta. [26] [27]

2.1.6. Akkutuotannon kustannukset

Argonne National Laboratory on laskenut akkupaketin tuotantokustannuksia ja hinnan muodostumista BatPac-kustannusarvio-ohjelmallaan (liite A). Vaikka yksittäisen kennon materiaalikustannukset ovat 95 \$/kWh, niin koko 80 kWh:n akkupaketin yksikköhinta on 185 \$/kWh. [28]

Akkupaketin kokonaiskustannuksista 64 % koostuu kennon materiaaleista. NCM622 kemiassa katodin aktiivimateriaalien osuus on 43 % kaikista kennomateriaalien kustannuksista. Grafiittianodin osuus on 19 %, erotinmateriaalin ja elektrolyytin osuudet ovat 13 % ja 11 % sekä katodin alumiinisen ja anodin kuparisen virranjohtimien materiaalikustannukset ovat vastaavasti 3 % ja 8 %.

Akkupaketin valmistuskustannusten osuus on noin 15,3 %. Kennojen pakkaamiseen hankittavien komponenttien, kuten johtimien, virtakiskojen, SOC-säätimien, kenno- ja moduulirakenteiden arvo on 14 % akkupaketin kokonaiskustannuksista.

Vuoden 2018 kustannuslaskemassa saman akkupaketin yksikköhinta oli 197 \$/kWh eli noin 6 % korkeampi kuin vuoden 2019 laskelmassa. Vuoden 2018 laskelmaan verrattuna katodin

materiaalipaksuutta oli kasvatettu 70 µm:stä 72 µm:iin samalla parantaen kennon kapasiteettia 220 Wh/kg:sta 227 Wh/kg:iin. Kustannusten alenemaan vaikuttivat myös parantunut kennojen valmistuksen saanto 83 %:sta 85 %:iin ja hieman laskenut erotinmateriaalin hinta 1,30 €/m²:sta 1,10 €/m²:iin.

2.1.7. Akkukennovalmistajat

Akkukennojen valmistus on voimakkaassa kasvussa ja useita investointeja kennotehtaisiin on parhaillaan käynnissä. Tehtaiden kapasiteetti ilmoitetaan vuodessa tuotettujen kennojen yhteenlasketun energian varastointikapasiteetin mukaisesti ja yksikkönä käytetään Wh.

Northvolt rakentaa kahta kennotehdasta Eurooppaan. Ruotsin Skellefteån rakenteilla oleva Northvolt Ett tulee olemaan valmistuessaan 2021 Euroopan suurin kennotehdas. Saksan Salzgitteriin VW ja Northvolt rakentavat erillisen yhteisyrityksen voimin toisen kennotehtaan Northvolt Zwei, jossa on jo vuoden 2019 aikana aloitettu kennojen pilottituotanto. Salzgitter sijaitsee VW:n kotivaltiossa Ala-Saksissa, joka on myös osakkaana kyseisessä yhteisyrityksessä.

VW on yksi Northvoltin pääomistajista noin 20 % osuudella. Northvoltin Ett kennotehtaan ovat sijoittaneet Goldman Sachs, BMW ja ruotsalainen eläkerahasto AMF.

Northvolt suunnittelee Ruotsiin litiumioniakkujen kierrätyslaitosta, joka tuottaisi vuoteen 2030 mennessä jopa puolet akkutuotannon raaka-aineista. Kierrätystä kokeillaan akkutuotannon pilottitehtaan naapurissa Västeråsissa. Varsinainen kierrätystehdas tulee Skellefteån Ett tehtaan yhteyteen ja sen on tarkoitus aloittaa toimintansa vuonna 2022. Northvolt Battery Systems Jeden Puolan Gdanskissa valmistaa akkumoduuleja noin 10 000 kpl vuodessa. [29] [30] [31]

Panasonic vastaa Teslan NCA-tyyppisten akkujen valmistamisesta mm. Teslan Nevadassa olevassa Gigafactory 1:ssä, jonka tuotantokapasiteetti on ollut tarkoitus nostaa 35 GWh:iin vuonna 2019.

Panasonic valmistaa Japanin ja Kiinan tehtaillaan täyssähkö- ja hybridiakkuja mm. Hondalle, Volkswagenille ja Toyotalle, mutta nämä perustuvat eri akkukemiaan kuin NCA. Teslan NCA-kennoja on kuitenkin käytetty Mercedes-Benz B250e mallissa ja myös Toyotan RAV4 EV:ssä vuosina 2012-2014. [32]

Panasonic ja Toyota julkistivat vuonna 2019 laajan yhteistyösopimuksen Panasonicin kennovalmistuksesta Toyotalle. [33] [34]

CATL (Contemporary Amperex Technology CO. Limited) on kiinalainen akkuvalmistaja, joka valmistaa akkuja pääasiassa kiinalaisille autonvalmistajille kuten: BAIC Motor, Changan, Foton Motor, GAC Group, Great Wall, Geely Automobile, SAIC Motor, Xiamen King Long, Yutong Bus ja Zhongtong Bus. CATL:n kennoja käyttävät myös PSA-konsernin Citroen DS3 E-tense ja Peugeot e-208. Geely omistaa myös Volvon henkilöautot, joissa todennäköisesti käytetään myös CATL:n akkuja.

Vuonna 2018 CATL tiedotti rakentavansa Saksan Erfurtiin kennotehtaan ja solmineensa BMW:n kanssa 4 miljardin arvoisen toimitussopimuksen. Vuonna 2017 CATL osti 22 % osuuden suomalaisesta Valmet Automotivesta ja Mercedes-Benz ilmoitti yhteistyöstä CATL:n kanssa. Keväällä 2019 tiedotettiin Salon akkutehtaasta, jonka tuotanto alkaisi syksyllä 2019. Tehtaan on kerrottu valmistavan akkupaketteja muualla valmistetuista kennoista, jotka todennäköisesti tulevat jatkossa Erfurtin tehtaalta. CATL:n asiakkaisiksi on spekuloitu BMW:n ja Daimlerin lisäksi Volkswagenia. [32]

AESC (Automotive Energy Supply Corporation) on Nissanin, Necin, ja Tokinin vuonna 2007 perustama akkuvalmistaja. AESC tuottaa akut Nissanin Leaf ja e-NV -sähköautoihin sekä ilmeisesti Renaultille. AESC:lla on tehtaas Japanissa, Englannissa ja Yhdysvalloissa sekä suunnitteilla 20 GWh:n tehdas Wuxiin Kiinaan.

BYD on tunnettu kiinalainen auto- ja akkuvalmistaja. Muista valmistajista poiketen BYD on valmistanut pitkään LFP-akkuja, joiden etuina ovat mm. pidempi käyttöikä sekä käyttöturvallisuus, mutta haittapuolena matala energiatiheys. Alkuvuonna 2019 myös BYD ilmoitti siirtyvänsä NCM-akkukemiaan.

BYD:llä ei ole akkutuotantoa Kiinan ulkopuolella, mutta se on kertonut etsivänsä paikkaa Euroopassa. Todennäköisimmät vaihtoehdot ovat Ranska ja Unkari, joissa se jo valmistaa sähköbussseja.

LG Chem on korealainen akkuvalmistaja, joka tekee akkuja mm. Audi E-tron, Jaguar I-pace, Porsche Taycan, Hyundai Ioniq ja Kona sekä Renaultin Zoe ja Twizy -automalleihin. Teslan Shanghain Gigafactory 3:n kennovalmistajana toimii LG Chem. [32] [35]

Samsung SDI on toinen korealainen akkuvalmistaja, joka on vastannut mm. BMW:n ja Volkswagenin akkutoimituksista. BMW on kuitenkin solminut yhteistyön CATL:n ja Northvoltin kanssa ja Volkswagen on puolestaan uhkaillut yhteistyön päättymisellä, kun Samsung ei ole kyennyt toimittamaan riittävää määrää akkuja. Toisaalta Samsungin on kerrottu toimittavan Jaguarin tulevien sähköautojen akut vuonna 2020 sekä akut Volvon uusiin sähkökuorma-autoihin. Samsungilla on Euroopassa tehdas Itävallassa ja se on aloittanut uuden 3 GWh:n tehtaan rakentamisen Unkariin.

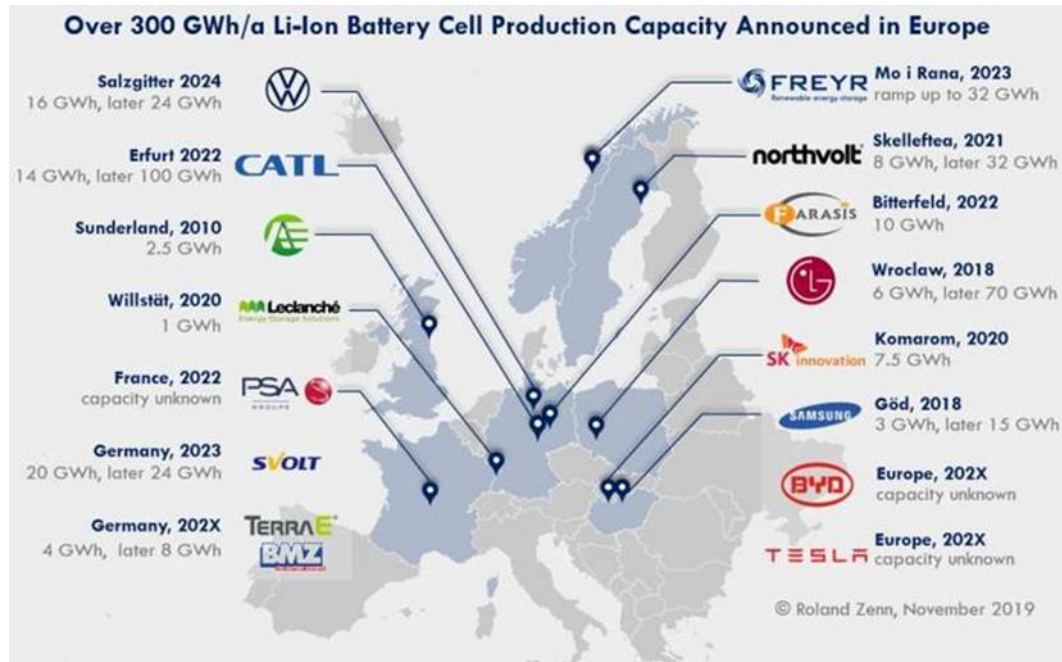
A123 Systems:n omistaa kiinalainen, autoteollisuuden suurin komponenttivalmistaja, Wanxiang Group. A123 Systems:n akkutuotannon pääpaino on hybridien akuissa, joita se valmistaa mm. BMW:lle. Sähköautojen akkuja yritys valmistaa SAIC:n Roewe-merkkille ja Navistarin jakeluautoihin.

SK Innovation on kolmas korealainen akkuvalmistaja, joka toimittaa akut mm. Kia e-Niro ja Soul-malleihin sekä Mercedes-Benz EQC-malliin, jonka akkupaketit Daimler kokoaa itse Kamenzin tehtaalla. SK Innovation rakentaa 7,5 GWh:n akkutehdasta Unkarin Komaromiin, jonka pitäisi aloittaa tuotanto vuonna 2020.

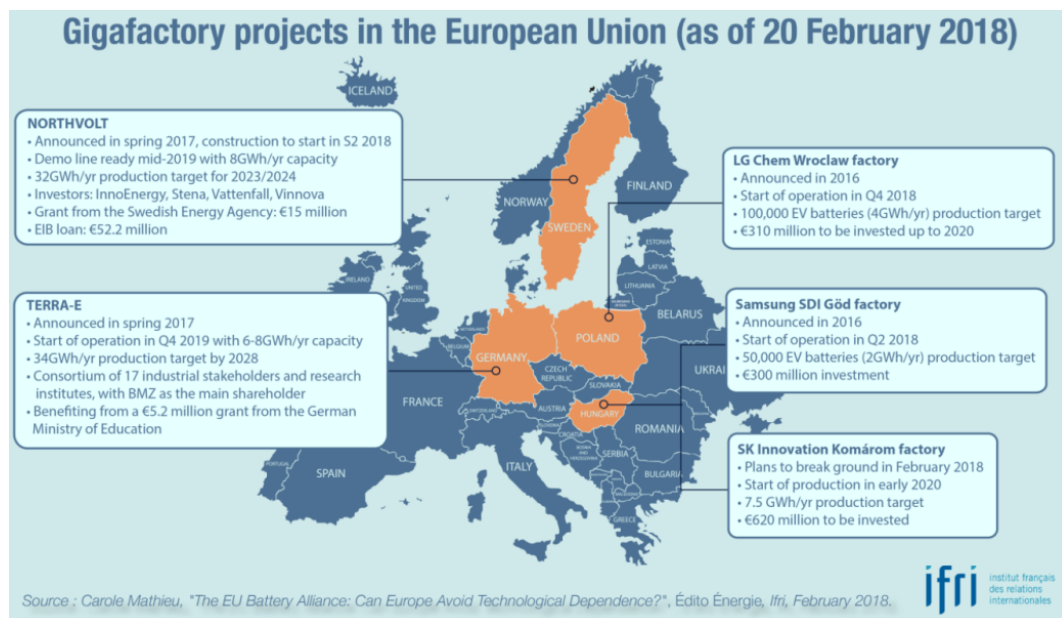
Terrae on saksalainen yhteenliittymä, joka on suunnitellut kahta tehdasta Eurooppaan. Uuden yrityksen rahoituksen riittävydestä on kuitenkin esitetty epäilyjä ja yrityksen sivuilla viimeisin uutispäivitys on yli puolen vuoden takaa toukokuulta 2019. [32]

Kuvissa 2.1-9 ja 2.1.-10 on esitelty Eurooppaan suunniteltuja ja rakenteilla olevia akkutehtaita. Teslan Gigafactory 4:n rakentaminen alkaa alkuvuodesta 2020 ja se sijoittuu Berliinin itäpuolelle. [36]

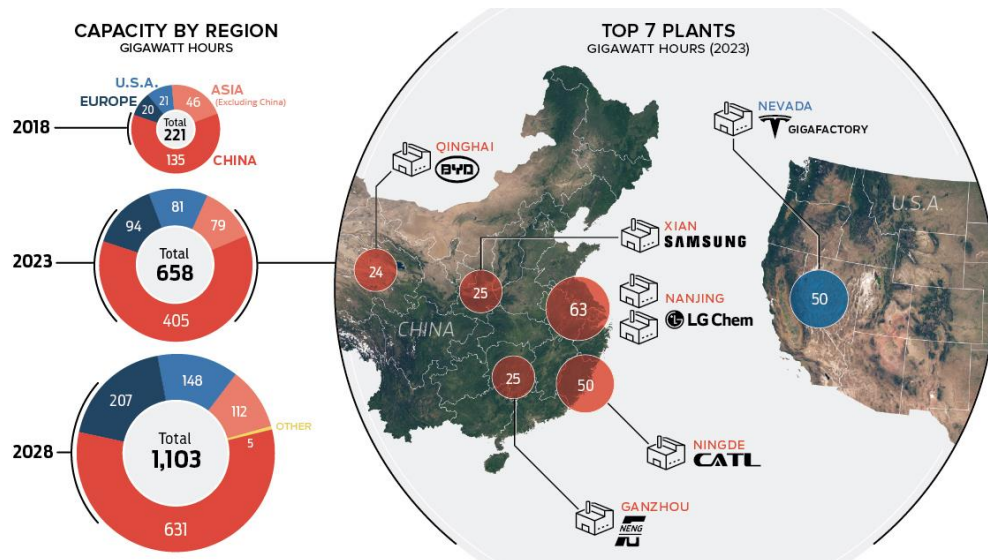
Kuvassa 2.1-11 on esitetty seitsemän suurinta akkutehdasta, joista vain yksi on Kiinan ulkopuolella Yhdysvalloissa. Syy tähän on Kiinan suuressa ja voimakkaasti kasvussa olevassa automarkkinassa. Kuvassa on esitetty, että maailmanlaajuisesti akkutuotantokapasiteettia olisi 1103 GWh vuonna 2028. Mikäli akkutuotantokapasiteetti käytettäisiin vain sähköautoihin, joiden keskimääräinen akustokoko olisi vain 50 kWh, riittäisi tämä tuotanto 20 miljoonaan autoon eli noin 20 %:iin vuodessa valmistettavista autoista. Lukema olisi siis vielä melko kaukana EV30@30-kampanjan tavoitteesta, jossa 30 % uusista autoista olisi täyssähköisiä vuonna 2030.



Kuva 2.1-9 Eurooppaan suunniteltuja akkutehtaita [37]



Kuva 2.1-10 Akkutuotanto Euroopassa [38]



Kuva 2.1-11 Akkutuotanto kapasiteetin kehittyminen [39]

2.2. Moottorit

2.2.1. Sähkömoottorien tyypit

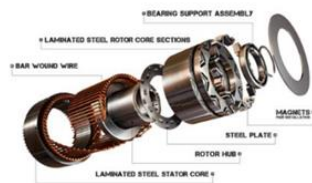
Ajoneuvoissa käytettyjen sähkömoottorien perustyyppit, kestopagneettimoottori, induktiomoottori ja reluktanssimoottori on esitetty kuvassa 2.2-1.

Kuvan kestopagneettimoottorissa magneetit on upotettu roottoriin V-muotoon. Tässä rakenteessa roottorin teräsrakenne suojaa magneetteja luonnollisesti mekaaniselta kontaktilta ja staattorikäämityksen lämpövaikutukselta. Toisaalta osa magneettien luomasta magneettivuosta vuotaa eikä kytkeydy staattorikenttään. Pintamagneettikone, jossa magneetit ovat roottorin pinnalla, on tässä suhteessa tehokkaampi, mutta magneettien ympärille joudutaan useimmiten asentamaan esim. lasikuitupanta, joka varmistaa magneettien liimauksen ja magneetteihin kohdistuvat keskipakovoimat.

Induktiomoottorin roottorissa on tyypillisesti joko alumiinista tai kuparista valmistettu häkkikäämi, johon muuttuva staattorikenttä indusoi sähkövirran ja voimavaikutuksen. Sen suuruus riippuu roottorin staattorikentän pyörimisnopeuserosta.

Reluktanssikoneessa roottorin geometria on luotu sellaiseksi, että se pyrkii pyörimään samaan tahtiin staattorikentän kanssa. Reluktanssi- ja kestopagneettikoneet ovat tyypillisiä tahtikoneita, joiden pyörimistaajuus on sama kuin staattorikentän pyörimistaajuus.

Permanent Magnet Motor



Examples:
BMW i3
BYD e6
Chery eQ

Induction Motor



Examples:
Tesla Model S
Renault Twizy
BJEV EC180

Salient Pole Synchronous Reluctance Motor



Examples:
Renault Zoe
Renault Fluence
Smart Fortwo



Source: General Motors, Renault, Adamas Intelligence research

Kuva 2.2-1 Ajoneuvoissa käytettyjen sähkömoottorien perustyyppit [40]

Kuvassa 2.2-2 on esitelty Tesla Model 3:n kestopagneettimoottoria. Vasemman puoleisessa kuvassa on esitetty nestejäähdytetyn moottorin runko ja staattori. Staattorin perinteisessä kääminnässä vyyhden päiden pituus on usein merkittävä moottorin aktiiviseen pituuteen nähden. Vyyhden päihin kohdistuu myös suurin lämpökuormitus, kun käämilangassa syntyvät resistiiviset lämpöhäviöt eivät siirry moottorin runkorakenteisiin yhtä tehokkaasti kuin esimerkiksi staattoriurissa olevista osista. Murtovakokäämityssä koneessa vyyhdenpäiden pituus on huomattavasti pienempi ja samalla myös lämpötilaerot käämityksen eri osissa ovat pienempiä.

Keskimmäisessä kuvassa on esitetty uppomagneettimoottorin roottori. Roottori on tyypillisesti pinottu sähköteräslevyistä, joiden paksuus on alle millimetrin kokoluokkaa. Samaa sähköteräslevyä käytetään myös staattorin aktiivisissa osissa. Tässä tapauksessa roottorin teräslevyihin on leikattu V-muotoiset kanavat, joihin kestopagneetit upotetaan.

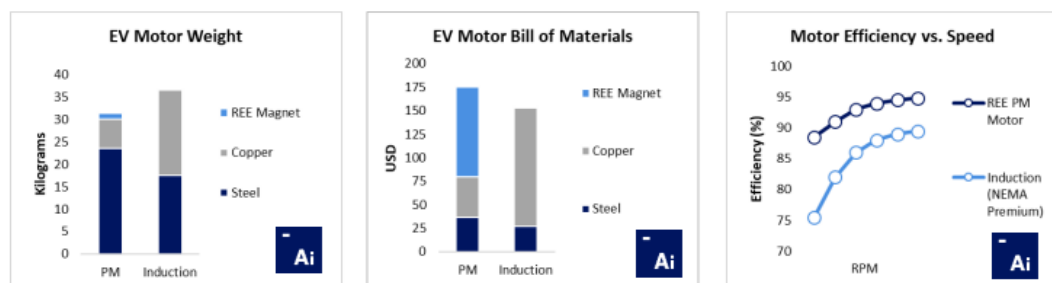
Oikean puoleisessa kuvassa on esitetty magneettikokoonpano, joka on koottu liimaamalla neljä yksittäistä magneettia yhteen. Lähteen mukaan magneetit muodostavat Halbach-rakenteen. [41]



Kuva 2.2-2 Tesla Model 3:n kestopagneettimoottorin staattori, roottori ja hahmotelma Halbach-magneetista [41]

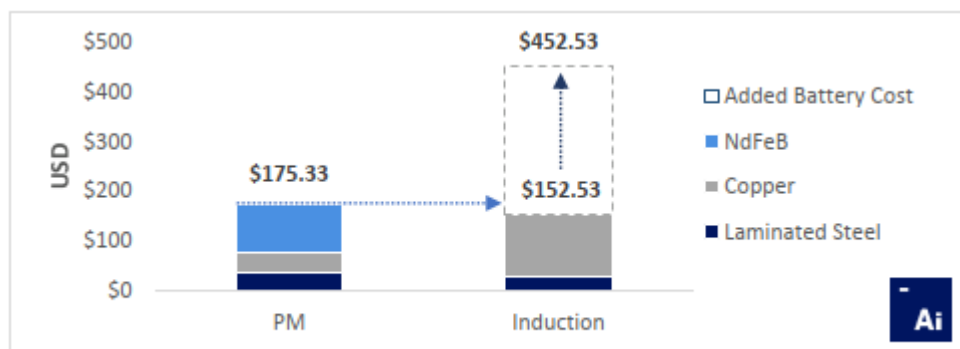
Yli 90 % nykyisistä sähköajoneuvoista perustuu kestmagneettimoottoriin. Induktiomoottoreiden hieman heikompi hyötysuhde vaatii suurempaa akustoa saman ajomäärän saavuttamiseksi. Induktiomoottorissa kestmagneettien poisjättämisellä saavutettu kustannushyöty hävitään isomman akun valmistuskustannuksissa kuten kuvissa 2.2-3 ja 2.2-4 on esitetty.

Keskimäärin sähköisten ajoneuvojen moottorin koko on 70 kW. Tämän kokoisessa kestmagneettimoottorissa on tyypillisesti käytetty 1,5 kg NdFeB-magneetteja, 6,5 kg kuparia ja 23,6 kg sähköterästä. Vastaavanlaisessa induktiomoottorissa, jonka roottorissa on käytetty kuparia, materiaalmäärät ovat 18 kg kuparia ja 17,5 kg sähköterästä. [42] [43]



Source: UBS, Control Engineering, Adamas Intelligence research

Kuva 2.2-3 Induktio- ja kestmagneettimoottorin painon, kustannusten ja tehokkuuden vertailua [43]



Source: Adamas Intelligence research

Kuva 2.2-4 Induktiomoottorin 5 % heikomman hyötysuhteen vaikutus 60 kWh:n akun omaavassa sähköautossa. [44]

Yleisesti autonvalmistajat eivät juurikaan kerro sähkömoottorien, akuston tai voimansiirron ominaisuuksista tai yksityiskohdista. [45]

2.2.2. Sähkömoottorien materiaalit

Sähkömoottorin käämityksessä käytetään tyypillisesti lakattua kuparilankaa. Induktiokoneessa häkkikäämi voidaan koostaa tangoista, joiden päät kytketään oikosulkurenkaalla. Kestomagneettikoneissa magneetit ovat tyypillisesti NdFeB-magneetteja. Ferriitti-magneetit ovat magneettisilta ominaisuuksiltaan liian heikkoja ja kasvattaisivat moottorin fyysisen koon moninkertaiseksi. SmCo-magneetit ovat merkittävästi kalliimpia kuin NdFeB-magneetit. SmCo-magneetteja käytetään yleensä yli 200°C käyttölämpötiloissa, joihin NdFeB-magneettien ominaisuudet eivät enää sovellu.

Staattorin ja roottorin aktiiviset teräsosat valmistetaan ohuista FeSi-sähköteräslevyistä pyörrevirta- ja hystereesihäviöiden minimoimiseksi. Pii-seostuksen määrä on yleensä noin 3 %.

Moottorien runko on tyypillisesti valmistettu joko alumiinista tai raudasta.

Sähköisesti aktiivisten materiaalien lisäksi sähkömoottoreissa käytetään tyypillisesti erilaisia muoviosia käämityksen sitomiseksi ja asemoimiseen, paperia sähköiseen eristämiseen sekä mahdollisesti epokseja ja hartseja käämityksen eristämiseen ja värähtelyvoimien sitomiseen. Pintamagneettikoneen magneettien kiinnitykseen voidaan käyttää myös lasikuitupantaa liimauksen varmistamiseksi. [16]

2.3. Tehon muokkaus

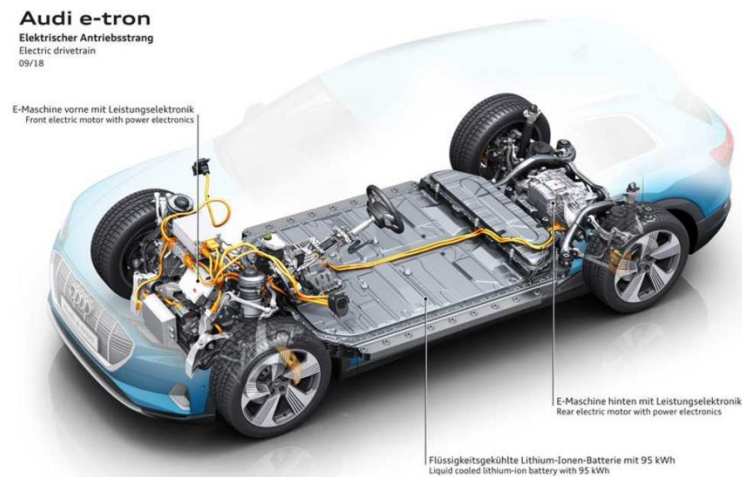
2.3.1. Tehoelektroniikka

Sähkömoottorien ohjaus on yleisesti toteutettu kolmivaiheisena taajuusmuuttajalla. Perinteistä tehoelektroniikkaa käytetään taajuusmuuttajan ja vaihtosuuntauksen lisäksi mm. akkujen virranhallinnassa ja liike-energian talteenotossa.

Kuvassa 2.3-1 on esitelty Audi e-tron mallin sähkömoottorin ja moottorinohjauselektroniikan sijoittelua. Latauspistokkeet sijaitsevat auton etuosassa ja tehon syöttökaapeli takamoottorille kulkee auton keskitunnelissa.

Tavallisessa kotilatauksessa lataustehot ovat suuruusluokkaa 2-8 kW riippuen siitä käytetäänkö yksi- vai kolmivaiheistapistoketta. Pikalatausasemilla lataustehot voivat olla jopa suuruusluokkaa 150 kW.

Tavallisesti häviöt latauksessa ovat pienillä lataustehoilla suuruusluokkaa 10-15 %, mutta suurilla tehoilla häviöt voivat nousta kaksin- tai kolminkertaisiksi. Häviöiden suuruus riippuu mm. akuston varaustilasta ja suuret lataus- ja purkutehot vaikuttavat tavallisesti heikentävästi akuston käyttöikään.



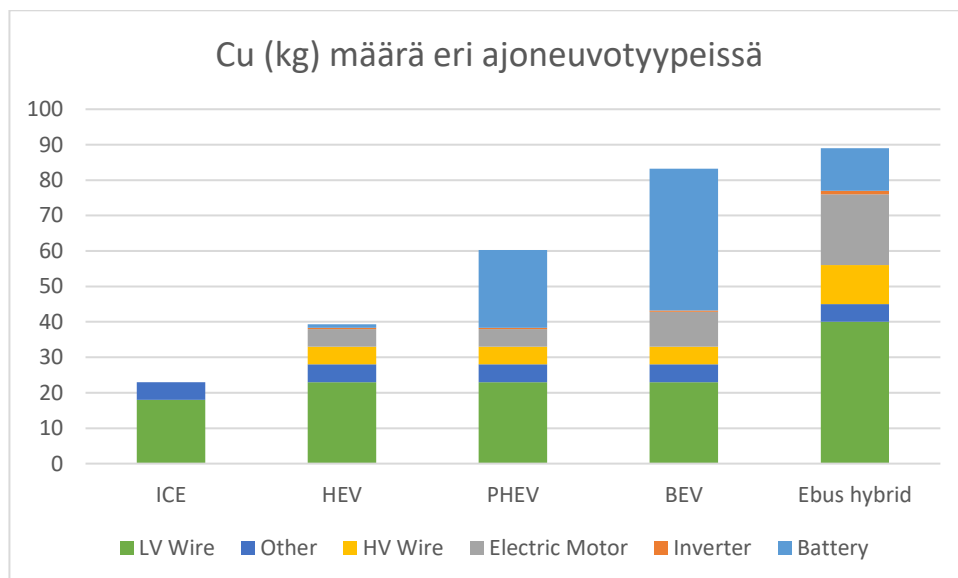
Kuva 2.3-1 Audi e-tron mallin sähkömoottorit ja moottorin ohjaus [46]

Sähkönsiirtokaapeleina ja -kiskoina on tavallisesti käytetty kuparia, mutta alumiiniakin voidaan käyttää erityisesti silloin, kun johtimen poikkipinta-ala on suuri eli suuren virtamäärän johtimissa. Alumiinin mekaanisten ominaisuuksien takia kuparijohdin on kuitenkin kestävämpi mm. ohuissa anturijohdotuksissa. Alumiinin heikomman sähköjohtavuuden takia johtimen poikkipinta-alan tulee olla 1,6-kertaa suurempi kuin kuparilla saman resistiivisyyden saavuttamiseksi. Toisaalta alumiini on yli kolme kertaa kevyempää kuin kupari, joten alumiinijohtimen metripaino on vain n. 50 % kuparin vastaavasta painosta, vaikka johtimilla on sama resistanssi. Alumiinin markkinahinta (0,79 \$/lb) on myös merkittävästi kuparia (2,62 \$/lb) alhaisempi, joten alumiinijohtimen metrihintaa on vain n. 15 % vastaavan kuparijohtimen hinnasta.

Kuvassa 2.3-3 on esitetty kuparituotteiden määrää perinteisessä polttomoottoriautossa (ICE) sekä hybridi- ja täyssähköautoissa. Kuvaajasta voidaan helposti havaita, että matalajännitteisten LV-johtimien määrä pysyy lähes vakiona moottorityypistä riippumatta. Merkittävin kuparin määrän kasvu tapahtuu akustossa, jonka koko on suurin täyssähköisessä autossa. Sähkömoottorin koko ja kuparin määrä on lähes sama ladattavassa ja ei-ladattavassa hybridissä. Vasta täyssähköautossa on selvästi suurempi ja tehokkaampi sähkömoottori. Hybridi-linja-autossa kuparituotteiden määrä on kokonaisuudessaan suurempi ja kasvaa samankaltaisesti kuin henkilöautoissa siirryttäessä hybridiajoneuvosta täyssähköiseen versioon.



Kuva 2.3-2 Alumiininen siirtokaapeli [47]



Kuva 2.3-3 Kuparin määrä erilaisissa polttomoottori- ja sähköajoneuvoissa [48]

Sähköisten ajoneuvojen moottorit tullaan jatkossakin kääntämään kuparijohtimilla. Induktiomoottorin roottorin häkkikäämi tai rakenne voidaan toteuttaa myös esim. alumiinivaluna, kuten mm. Audin e-tron mallissa on toteutettu.

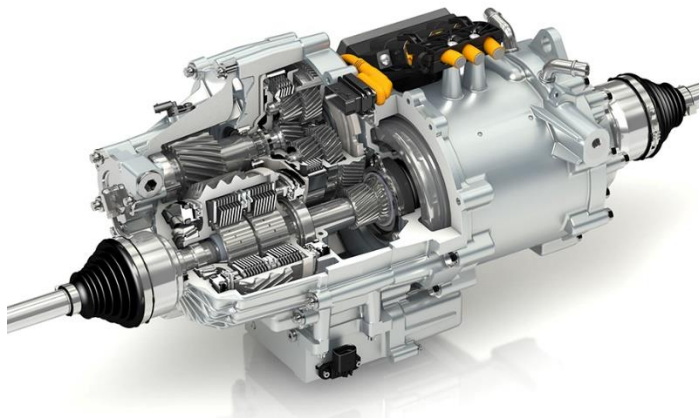
2.3.2. Voimansiirto

Lähes kaikissa sähköautoissa moottorien ohjaus perustuu korkeaan jännitteeseen, jolloin virrat ja virtajohtimet voidaan pitää pieninä. Esim. Tesla Model 3 akusto (80 kWh) on kytketty siten, että napajännite on 350 V (230 Ah). Mikäli 300 kW:n moottorin pääjännite olisi 400 V, ovat vaihevirrat maksiteholla silti yli 400 A. Nykyisissä Tesla S-mallissa yksittäisen moottorin maksimitehot ovat jo 400 kW.

Korkeampi jännitetaso mahdollistaisi matalammat sähkövirrat ja poikkipinta-alaltaan pienempien johteiden käytön samalla siirtohäviöllä. Toisaalta korkeiden jännitteiden käyttö puolijohteissa ja muuallakin lisää läpilyöntiriskiä ja kasvattaa sähköisten eristeiden vaatimustasoa.

Suomalaisessa Toroidian urheiluautossa on moottorit jokaisella renkaalla ja tavallista monimutkaisempi staattorikäänitys, joka mahdollistaa moottorin jakamisen sähköisesti esim. 5 osaan. Tämä vaatii kuitenkin yhden taajuusmuuttajan sijaan 5 ja vastaavan määrän moottorin virransyöttökaapeleita. Kyseisen automallin alkuvaiheessa lasketut erittäin korkeat hyötysuhteet herättivät kiinnostuksen kyseisen tekniikan kilpailukykyyn, mutta samalla myös aiheellisen epäilyksen laskelmien paikkansapitävyydestä.

GKN Automotive, joka on maailman johtava voimansiirtolinjojen valmistaja, on kehittänyt ensimmäisen kaksivaihteisen vaihteen sähköautoihin. Vaihteisto mahdollistaa pienempien ja suurempinopeuksisten moottoreiden käytön sekä parantaa energian takaisin keruuta alhaisissa nopeuksissa.



Kuva 2.3-4 GKN Automotiven 2-vaihteinen vaihteisto sähköautoihin [49]

Audin e-tron mallia jarrutetaan sähkömoottorien voimin 0,3 g:n hidastuvuuteen asti, mikä kattaa yli 90 prosenttia kaikista jarrutustarpeista. Jyrkissä alamäissä auto kykenee lataamaan akkuihinsa energiaa kilometrin matkalla 2–3 kilometrin ajotarpeisiin. Normaali ajossa rekuperaatio eli liike-energian talteenotto voi tuottaa jopa kolmanneksen auton kokonaistoimintasäteestä. [50]

Moottorin ohjauselektroniikka riippuu osittain käytössä olevasta akustosta ja sen rajoitteista, mutta suuremmalta osin käytettävästä moottorista ja sen käämityksestä. Tekniikka tulee todennäköisesti olemaan samaa kuin tavallisissa sähkömoottorien ohjauksissa, mutta ohjauksen säätöarvoja tullaan kehittämään mahdollisimman energiatehokkaiksi, koska tämä vaikuttaa suoraan ajoneuvon ajomäärään. [51]

3. Kehitystrendit ja volyymit teknologiametallien kysynnän kannalta

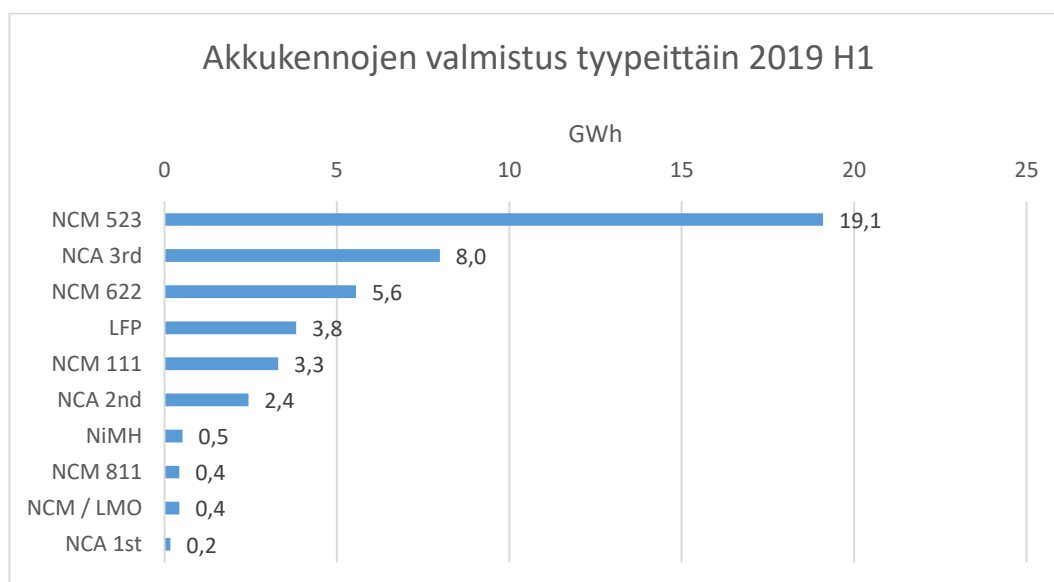
3.1. Akkukemian kehitys

Akku on sähköauton suurin ja merkittävin komponentti. Teknologiametallien kysynnän kehitystrendit ja volyymit riippuvat lähes täysin vallitsevasta akkukemiasta. Moottorissa käytettävän kuparin määrä on vain kymmenesosa 100 kWh:n akustossa käytettävään kupariin verrattuna.

Optimistisimpien ennusteiden mukaan vuosina 2020, 2025 ja 2030 sähköautoja valmistetaan 1,4, 8 ja 35 miljoonaa kappaletta, kun autojen vuosittainen kokonaistuotanto määrä on noin 100 miljoonaa kappaletta.

Kuvassa 3.1-1 on esitetty akkukemien valmistusmäärät maailmanlaajuisesti akkutyypeittäin alkuvuonna 2019. Tällä hetkellä lähes kaikki sähköautot perustuvat joko NCA (Tesla) tai NCM (muut) akkukemiaan. Näiden voidaan olettaa hallitsevan markkinoita myös vuonna 2030. Akkukemioissa kehitystä on tapahtunut erityisesti Co-riippuvuuden pienentämisessä, mikä näkyy mm. alkuvuonna 2019 hallitsevan NCM 532 materiaalin tulevissa NCM622 ja NCM811 versioissa.

Vastaavasti NCA:n ensimmäisen sukupolven versiossa nikkelin, koboltin ja alumiinin suhteet olivat $\text{Ni}_{0.80}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}$, kun NCA 2nd ja NCA 3rd kemioissa suhteet ovat jo $\text{Ni}_{0.85}\text{Co}_{0.10}\text{Al}_{0.05}$ ja $\text{Ni}_{0.87}\text{Co}_{0.07}\text{Al}_{0.06}$. Eli tässäkin tapauksessa koboltin määrä on puolittunut alkuperäisestä. Anodimateriaalia on pyritty parantamaan lisäämällä tyypillisesti käytettyyn grafiittiin piitä energiatheyden kasvattamiseksi.



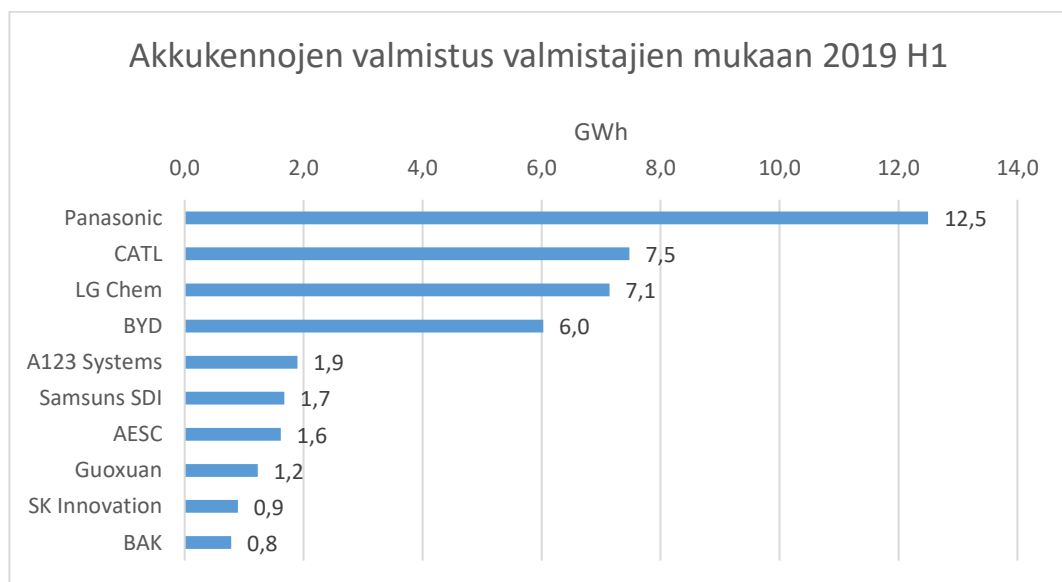
Kuva 3.1-1 Yllä olevassa kuvaajassa on esitetty akkukemien valmistusmäärät akkukemian mukaan aikavälillä 1-6/2019 [40]

Kiinalainen BYD on ollut merkittävä LFP-kemien valmistaja ja käyttäjä, mutta loppuvuodesta 2019 se on kuitenkin kertonut siirtyvänsä LFP:sta NCM-akkukemiaan.

Vuonna 2019 kiinalainen CATL on alkanut tuottaa kaupallisesti NCM811-kennoja. AESC on myös julkistanut kaupallistavan NCM811-kennon vuonna 2020. Volkswagen on ilmoittanut ottavansa NCM811 kennot käyttöön vuonna 2021. [33] [52]

Toyota on ilmoittanut lähivuosina esittelevänsä solid-state akun, jossa nestemäinen elektrolyytti on korvattu kiinteällä aineella. Tämä mahdollistaisi entistä korkeamman energiakapasiteetin. Haasteena on kuitenkin ollut kyseisen akun korkeat valmistuskustannukset.

Kuvassa 3.1-2 on esitetty akkukennojen valmistusmäärät valmistajien mukaan.



Kuva 3.1-2 Yllä olevassa kuvaajassa on esitetty akkukennojen valmistusmäärät valmistajien mukaan aikavälillä 1-6/2019 [40]

Tesla asensi alkuvuoden 2019 aikana autoihinsa akkuja 11 GWh edestä, mikä näkyy myös Panasonicin johtavassa asemassa ja kennojen valmistusmäärässä.

Huhtikuussa vuonna 2019 sähköisiin ajoneuvoihin asennettu akkukapasiteetti kasvoi 69 % vuoden 2018 määrästä. Samalla aikajaksolla asennettujen NCM523 akkujen määrä kasvoi 87 %. Nousevien NCM622 ja NCM811 akkukemioiden osuus kasvoi vastaavasti 247 % ja 251 %.

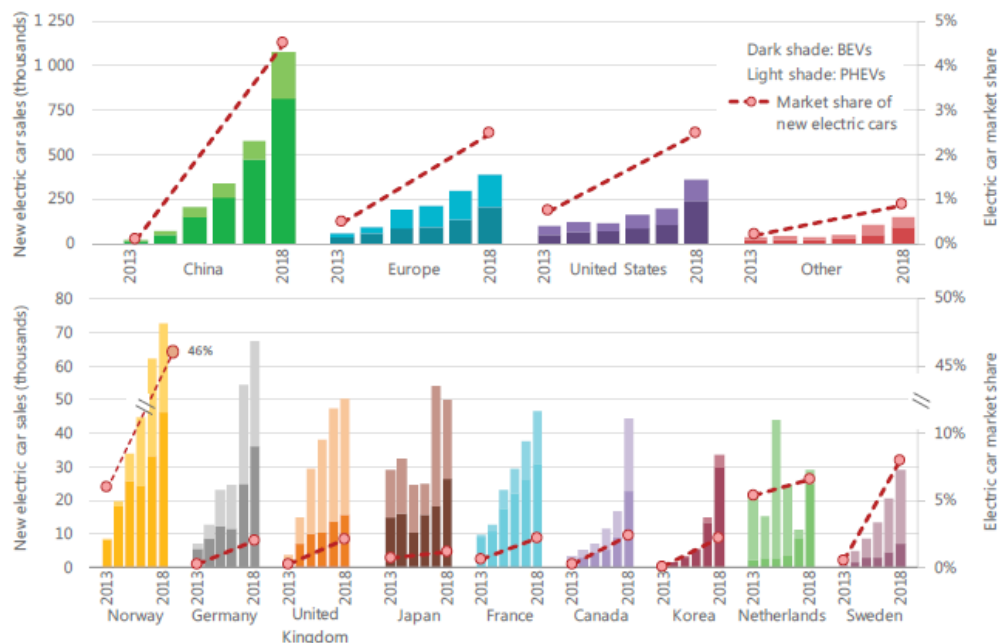
Syyskuussa 2019 Kiinassa myytyjen sähköautojen akkukapasiteetista 18 % perustui NCM811 kennoihin. Maailmanlaajuisestikin 7 % tuotetuista kennoista perustui NCM811-kemiaan. Kiinassa NCM811 oli toiseksi yleisin akkukemia NCM523:n jälkeen elo- ja syyskuussa 2019, kun taas NCM622 oli vasta viidenneksi yleisin 5 % markkinaosuudella. Alhaisempiin kustannuksiin ja korkeampaan energiatiheuteen perustuen useimmat autovalmistajat Kiinassa ovat siirtyneet LFP ja NCM523 kennoista suoraan NCM811-kennoihin. Kiinan ulkopuolella NCM811-kennoihin siirtyminen on ollut hyvin vähäistä, mutta muutoksen odotetaan tapahtuvan vuoden 2020 aikana.

3.2. Sähköautojen määrän kehitys

Maailmanlaajuisesti autoja valmistetaan noin 100 miljoonaa kappaletta vuodessa ja määrä on hienoisessa kasvussa johtuen erityisesti Kiinan kasvavista ajoneuvomarkkinoista. 2000-luvulla uusien autojen vuosittainen myyntimäärä on kasvanut noin 2 miljoonalla joka vuosi. Vuonna 2018 EU:ssa myytiin uusia autoja 20,7 miljoonaa, USA:ssa 17,7 miljoonaa ja Kiinassa 28,1 miljoonaa. Tämä tekee EU:ssa 40 uutta autoa tuhat ihmistä kohden, USA:ssa 54 ja Kiinassa 20.

Kuvassa 3.2-1 on esitetty ladattavien PHEV ja BEV sähköautojen myyntimääriä ja markkinaosuuksia vuosina 2013-2018. Kiinassa ladattavien sähköautojen myyntimäärä on ollut vuonna 2018 hieman yli miljoona ajoneuvoa, mikä on selvästi enemmän kuin missään muualla. Täyssähköautojen osuus näistä on ollut kolme neljänestä. Ladattavien PHEV ja BEV myynnin markkinaosuuksissa Norja on ollut aivan omilla luvuillaan - 46 % osuus vuonna 2018. Vastaavasti myös Ruotsissa ladattavien sähköautojen markkinaosuus kaikista autoista oli 8 % vuonna 2018.

Figure 1. Global electric car sales and market share, 2013-18



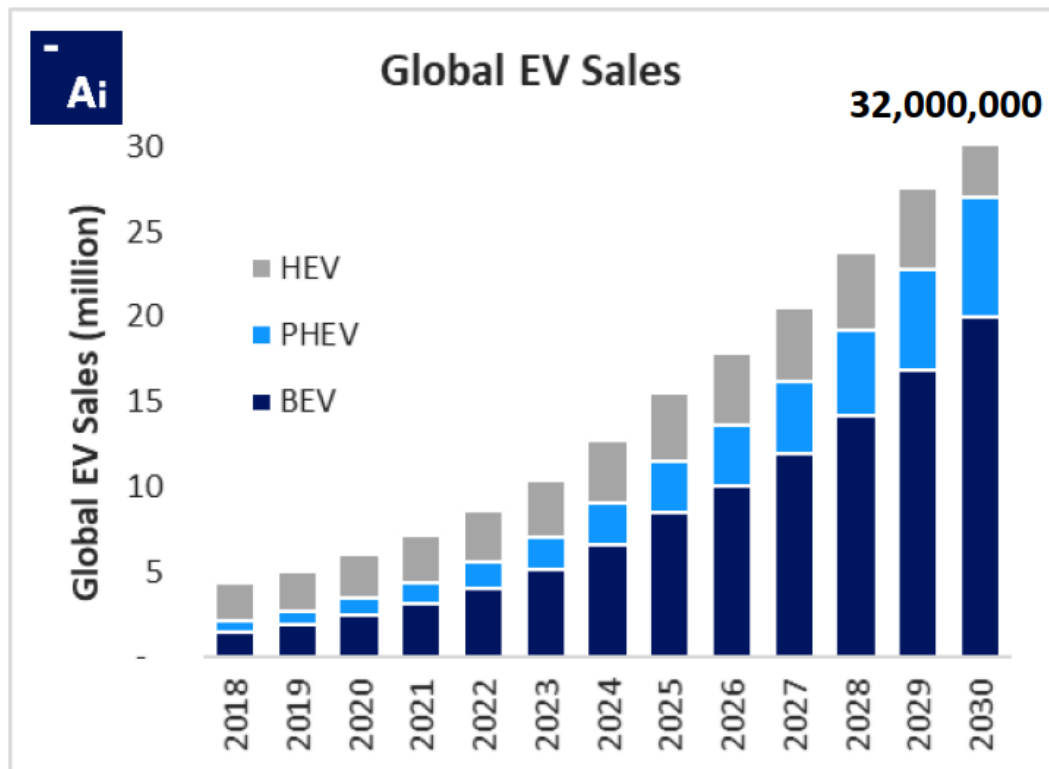
Notes: BEVs = battery electric vehicles; PHEVs = plug-in hybrid electric vehicles. Europe includes Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus,² Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Liechtenstein, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and United Kingdom. Other includes Australia, Brazil, Chile, India, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, New Zealand, South Africa and Thailand.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by ACEA (2019); EAFO (2019); EV Volumes (2019); Marklines (2019); OICA (2019).

China has the largest number of electric car sales worldwide, followed by Europe and the United States.

Kuvissa 3.2-2 ja 3.2-3 on esitetty arvioita sähköisten ajoneuvojen myynnin kasvusta. Näistä uudemmassa kuvassa 3.2-2 arvioidaan, että vuonna 2030 myytäisiin noin 20 miljoonaa täyssähköautoa, hybridit mukaan laskettuna noin 32 miljoonaa autoa yhteensä.

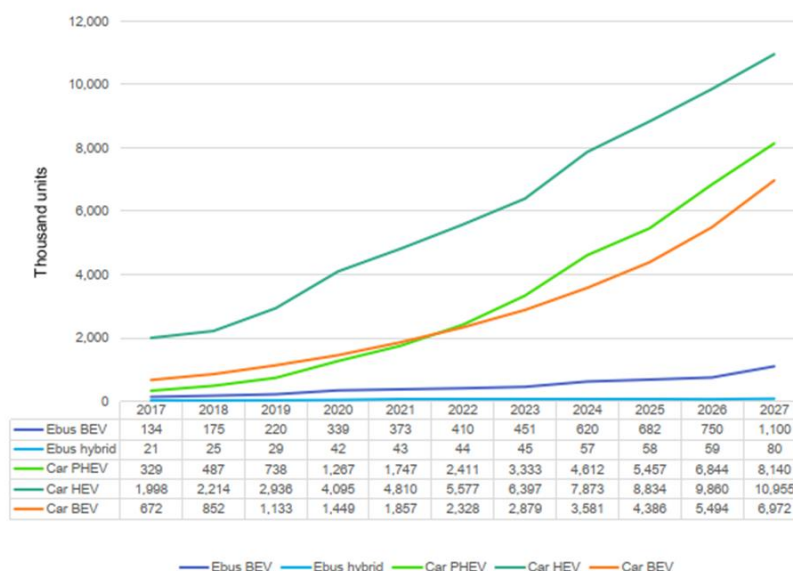
Suomi on mukana EV30@30-kampanjassa, jossa pyritään tavoitteeseen, että Suomessa täyssähköisten autojen myyntimäärä olisi vähintään 30 % kaikista myydyistä autoista vuonna 2030. Ennusteen 20 miljoonaa täyssähköautoa olisi vasta n. 20 % myydyistä autoista.



Kuva 3.2-2 Adamas Intelligence: Arvio sähköisten ajoneuvojen maailmanlaajuisesta myynnistä [43]

Kuvassa 3.2-3 on esitetty hieman vanhempi ennuste sähköautojen yleistymisestä. Merkille pantavaa on, että tässä tapauksessa vuonna 2027 on oletettu myytävän noin 7 miljoonaa BEV täyssähköauto, kun taas kuvassa 3.2-2 vastaava arvio on noin 12 miljoonaa. Toisaalta vanhemman ennusteen mukaan tuolloin myytäisiin selvästi eniten HEV hybridi-autoja ja ladattavia PHEV hybridejäkin enemmän kuin täyssähköautoja, toisin kuin uudemmassa ennusteessa, jossa 2020-luvulta lähtien myydään eniten juurikin täyssähköversioita.

Electric vehicle forecast - IDTechEx



Copyright © IDTechEx | www.IDTechEx.com

Source: IDTechEx 2017

IDTechEx

Kuva 3.2-3 IDTechEx: Arvio sähköisten ajoneuvojen maailmanlaajuisesta myynistä [48]

Eräissä arvioissa sähköautot saattaisivat tulla polttomoottoriautoja halvemmiksi, jos kennojen hintataso laskisi alle 80 \$/kWh. Näin on arvioitu tapahtuvan ehkä 2030-luvulla. [54] [55]

Täyssähköautojen akkujen keskimääräinen koko ja saavutettavat WLTP-ajomäärät ovat jatkaneet kasvua. Vuonna 2019 pienempien sähköautojen, mm. VW I.D., Hyundai Kona, DS 3 keskimääräinen akkukoko on ollut 50 kWh ja saavutettava ajosuorite noin 300 km. Pienemmissä autoissa keskimääräinen energian kulutus on suuruusluokkaa 16-18 kWh/100 km, kun taas suuremmissa SUV-mallisilla ajoneuvoilla energiankulutus on suuruusluokkaa 20-22 kWh/100 km. [56]

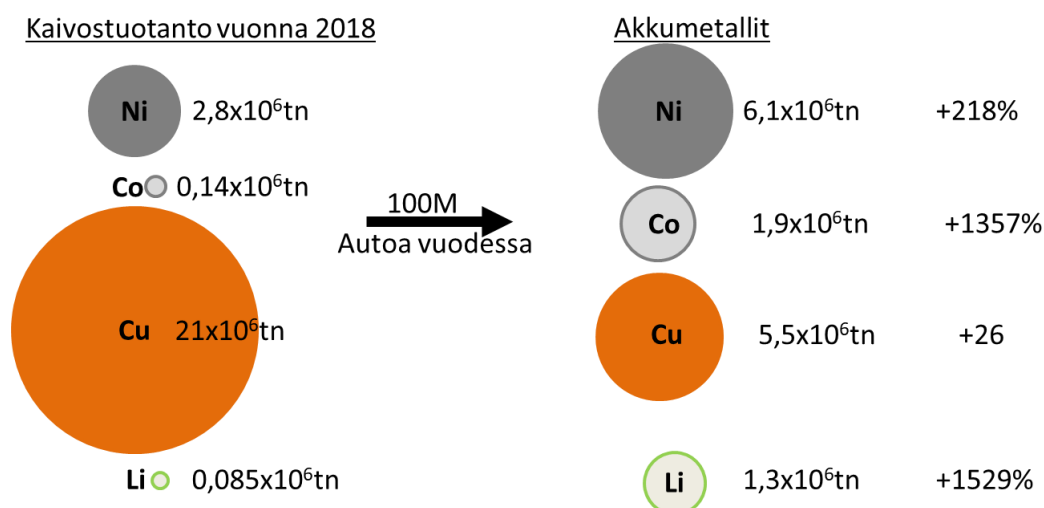
Ladattavissa hybridi ajoneuvoissa akkujen kokoluokkaa on kasvatettu päästövaatimusten ja verohelpotusten vuoksi. [55]

Akusto on sähköauton kallein komponentti ja sen kestävydestä on ollut epäilyksiä. Teslan akut näyttäisivät kestävän hyvin 1000 täyttä lataus sykliä eli 500 km ajosuoritemäärällä tämä tarkoittaisi 500 000 km kokonaisajomäärää. NCM-akkukemian sykli-ikä on jopa NCA-kemialla suurempi, joten akuston voisi olettaa kestävän koko auton suunnitellun iän. [57] [58]

4. Primääri raaka-aineiden saatavuus ja metallien kierrätys

4.1. Akkumetallien varannot ja tuotanto

Yhteensä 100 kWh:n NCM622-tyyppiseen akkuun tarvitaan 13 kg litiumia, 61 kg nikkeliä, 19 kg kobolttia ja 55 kg kuparia. [59] Kuvassa 4.1-1 on havainnollistettu akkumetallien kaivostuotannon määrää verrattuna metallien tarpeeseen tilanteessa, jossa kaikki vuosittain valmistettavat 100 miljoonaa autoa varustettaisiin tällaisella akulla. Tarkastelussa ei ole otettu huomioon sähkömoottoriin tarvittavia metalleja. Sähköisessä ajoneuvossa keskimääräisen kestopagneettimoottorin teho on 70 kW, johon tarvitaan mm. 1,5 kg NdFeB-magneetteja ja 6 kg kupari. Tarkastelussa ei ole huomioitu myöskään muita ajoneuvon kuparijohtimia, joita sähköautossa on yhteensä noin 30 kg.



Kuva 4.1-1 Akkumetallien kaivostuotanto vuonna 2018 ja akkumetallien tarve, jos kaikissa myytävissä autoissa olisi 100 kWh NCM622 akku [60]

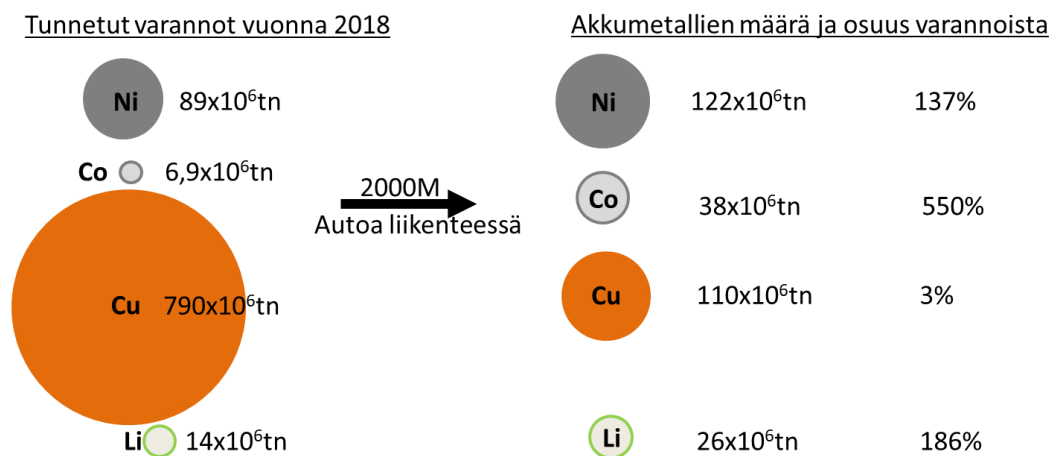
Kuvasta 4.1-1 voidaan helposti havaita, että koboltin ja litiumin tuotannon pitää kasvaa erittäin merkittävästi autokannan sähköistyessä. Eräiden ennusteiden ja tavoitteiden mukaan 30% valmistettavista autoista olisi täyssähköautoja vuonna 2030. Se tarkoittaisi, että kymmen vuoden päästä kyseisten akkumetallien tarve olisi n. 30% yllä esitetystä. Tässäkin tapauksessa litiumin tuotannon pitäisi kasvaa 460 % ja koboltin 407 % vuoden 2018 tuotantoluvuista.

Laskelmaa voi tarkentaa sillä, että käyttää NCM622 materiaalin sijaan NCM811 katodimateriaalia, jolloin koboltin tarve puolittuu, mutta nikkeliä tarvitaan kolmannes enemmän. Mahdollisesti tulevaisuudessa valmistettavalla NCM9.5.5-katodimateriaalilla koboltin määrä olisi vain neljännes yllä esitetystä, mutta nikkelin tarve olisi sitten jo 50 % suurempi.

Litiumin tarve pysyy samana kaikissa edellä esitetyissä akkumateriaalivaihtoehtoissa.

Koboltin arvo on tällä hetkellä noin 32 000 \$/tn, kun taas LCE eli Li_2CO_3 arvo on noin 9 000 \$/tn. Litium metallin arvo tästä litiumkarbonaatista laskettuna olisi siis noin 46 000 \$/tn.

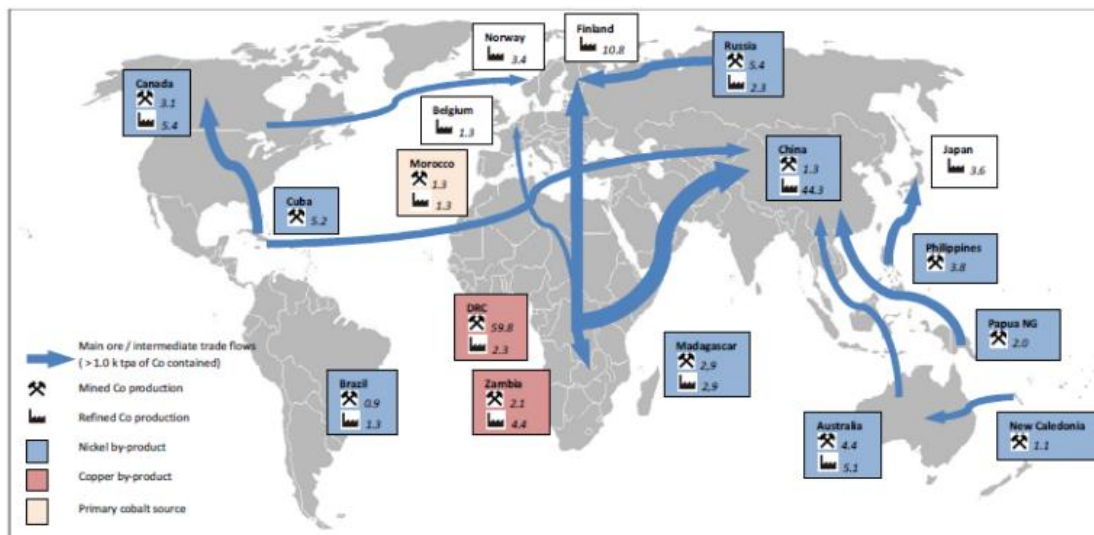
Kuvassa 4.1-2 on esitetty vastaavaa laskelmaa, jossa on verrattu akkumetallien tunnettuja varantoja siihen, että kaikissa liikenteessä olevissa autoissa, joita on siis 2 miljardia, olisi edellä mainittu 100 kWh:n NCM622 akku.



Kuva 4.1-2 Akkumetallien tunnetut varannot vuonna 2018 ja akkuihin varastoituneiden metallien määrä, jos kaikissa liikenteessä olevissa autoissa olisi 100 kWh NCM622 akku [60]

Yllä olevasta kuvasta voidaan taas havaita, että koboltin tarve ylittää reilusti tällä hetkellä tunnetut varannot. Toisaalta jos tässäkin tapauksessa vaihdetaan akkumateriaali NCM811 tai NCM9.5.5:een niin koboltin tarve puolittuu tai tipahtaa neljäsosaan. Nikkelin tarve kasvaisi samalla taas 33 % tai 50 % yllä esitetystä, jolloin viimeisimmässä tapauksessa kovin kysyntä kohdistuisikin nikkeliin ja litiumiin.

Kuvassa 4.1-3 on esitetty koboltin kaivostuotantoa ja jalostusta. Koboltin tuotannossa Kongo on odotetusti suurin ja jalostuksessa Kiina. Suomen osuus maailman koboltin jalostuksesta on kuitenkin noin 13 %. Litiumin tuotanto on keskittynyt Australiaan, Chileen ja Argentiinaan. Grafiitin tuotannossa Kiina on suurin. Grafiitista on tällä hetkellä maailmassa ylituotantoa. [60] [61] [62]



Kuva 4.1-3 Koboltin kaivostuotanto ja jalostus [63]

4.2. Akkumetallien riittävyys

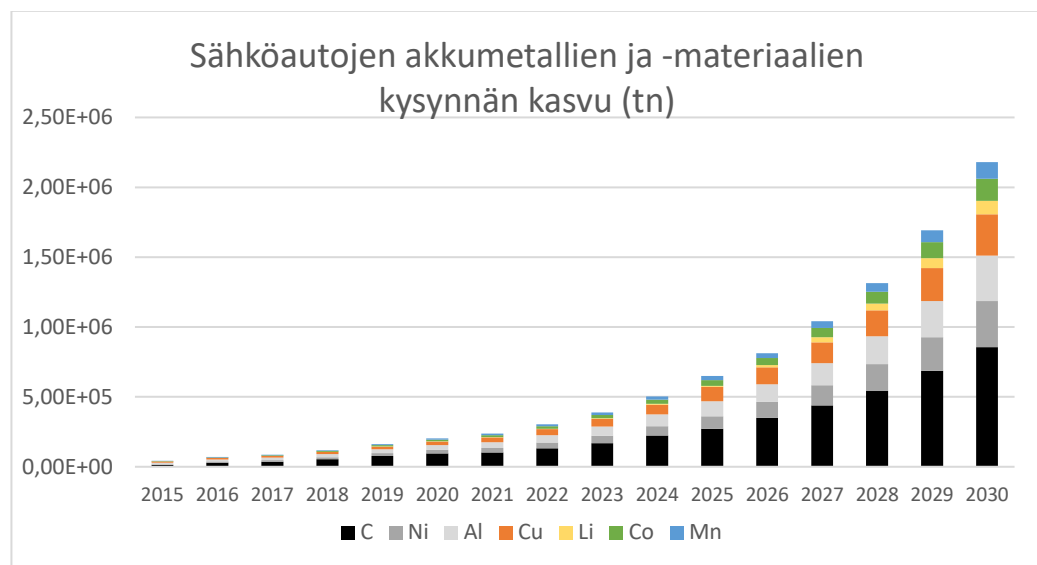
Vuoden 2017 elokuussa julkaistussa Bloomberg News:n artikkelissa käytiin läpi teknologiametallien kysynnän kasvua autokannan sähköistyessä. Kuvassa 4.2-1 on esitetty artikkelissa ennustettu metallien kysynnän kasvu. Kuvaajassa mm. alumiinin suhde nikkeliin on kuitenkin turhan korkea, mikä on voinut johtua vuonna 2017 paljon huomiota saaneista Teslan akustoista. Mutta kuten edelläkin on havaittu, niin erityisesti koboltin ja litiumin tuotannon pitää kasvaa hyvin voimakkaasti kattaakseen sähköautojen akkuihin tarvittavien metallien tarpeen. Koboltin osalta myös tunnettujen varantojen määrän pitää kasvaa merkittävästi.

Koboltin tarvetta voidaan vähentää vähän koboltia sisältäviä anodimateriaaleja, mutta tällöin usein nikkelin määrä pitää kasvattaa entisestään. Litium toimii nykyisissä akkukemioissa varauksenkuljettajana, joten sen kysyntä tulee kasvamaan asennettavan akkukapasiteetin mukaan.

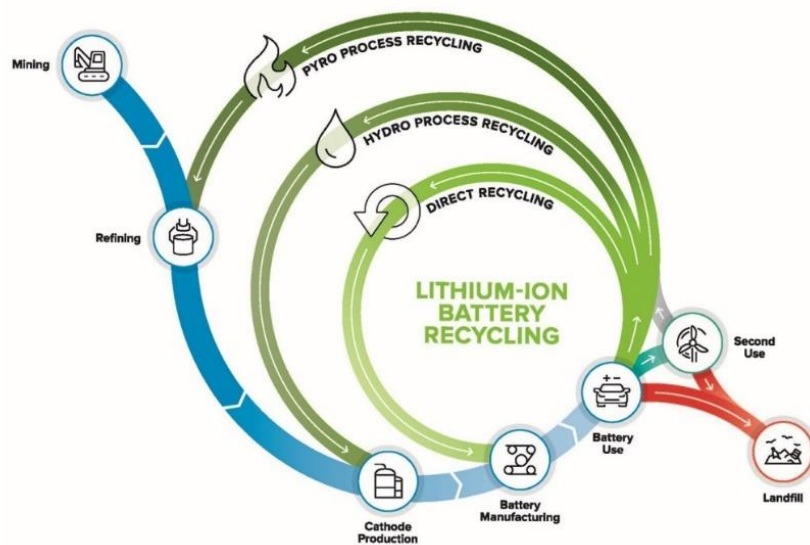
Akkumetallien riittävyyden kannalta kierrättäminen on välttämätöntä. Pelkästään kennojen valmistuksessa saanto on suuruusluokkaa 85 % eli lähes kuudesosa valmistetuista kennoista menee hylkyyn. Nämä vialliset kappaleet on purettava ja käytettävä materiaalit uudelleen. Kuvassa 4.2-2 on esitetty periaatekuvaa litiumioniakkujen kierrättämisestä.

Suorassa kierrätysmenetelmässä akkukennot puretaan siten, että osat voidaan käyttää uudelleen. Tämä tarkoittaa siis lähinnä aktiivisten katodi- ja anodimateriaalien erottamista ja uudelleenkäyttöä. Argonne National Laboratoryssä Yhdysvalloissa tutkitaan mahdollisuuksia tällaiseen kierrättämisprosessiin. Valmiita suoran kierrättämisen prosesseja ei vielä ole olemassa. Hydrometallurgisella kierrätysprosessilla akkukennojen sisältämät metallit voidaan erotella toisistaan uudelleenkäytettäväksi esimerkiksi katodinvalmistuksessa. Prosessin etuina ovat alhainen energian tarve ja korkeat materiaalien saannot. Toisaalta haittapuolena erilaisten kemikaalien kulutus ja mahdollisten happolietteiden käsittely, sekä kemiallisten reaktioiden nopeus. Pyrometallurginen kierrätys on ehkä helpoin, mutta paljon energiaa vaativa. Toisaalta myös alumiinin ja litiumin talteen saanti tällä menetelmällä on erittäin haastavaa. [53] [64]

Liikennekäytöstä poistuneita akkumoduuleja voidaan mahdollisesti käyttää myös jossakin toisessa sovelluskohteessa. Esimerkiksi 50 % tasolle alkuperäisestä kapasiteetistaan kulunut akku voi seuraavan kymmenen vuoden ajan toimia vaikkapa aurinko- tai tuulivoimalan sähkövarastona. Konkreettisia sopimuksia on tällaisesta jo tehty, kun Hyundai ja Wärtsilä sopivat käytettyjen sähköautoakkujen käytöstä energian varastointiin. [9]



Kuva 4.2-1 Sähköautojen teknologiametallien kysynnän ennustettu kasvu [65]



Kuva 4.2-2 Litiumakkujen kierrätys [66]

5. Satakunnan teknologiametalliklusterin nykyiset liittynät sähköautoihin

Satakuntalaisessa teknologiametalliklusterissa valmistetaan monenlaisia metalleja sekä metallituotteita ja -kemikaaleja, joita hyödynnetään myös sähköautoissa tai sähköautojen komponenttien valmistuksessa.

Harjavalan Suurteollisuuspuistossa toimivat Boliden Harjavalta ja Nornickel Harjavalta jalostavat rikasteista mm. kuparia, nikkeliä ja kobolttia. Osa Bolidenin tuottamasta kuparista menee Porin Kupariteollisuuspuistoon jatkojalostettavaksi mm. sähköautoteollisuuden tuotteiksi. Nornickelin tuottama nikkeli päätyy vielä toistaiseksi suurelta osin ruostumattoman teräksen valmistukseen, mutta tulevaisuudessa yhä enenevässä määrin akkukemikaaliksi. Nikkelituotannon sivutuotteena syntyvä kobolttisulfaatti menee myös akkuteollisuuteen.

BASF on ilmoittanut rakentavansa pre-katodimateriaalitehtaan Harjavaltaan. Tehtaan on määrä käynnistyä vuonna 2022. BASF:n tehdas hyödyntää Nornickelin tuottamia nikkeli- ja kobolttikemikaaleja. BASF jatkojalostaa Harjavallassa tuottamansa pre-katodimateriaalin vielä katodimateriaaliksi, ennen kuin toimittaa sen asiakasyritykselle katodin valmistukseen. Tämän jatkojalostuslaitoksen BASF on ilmoittanut rakentavansa Saksaan, vaikka Satakuntakin oli tiiviisti mukana kilpailussa sijoittumispaikasta. EU:n hyväksymillä, poikkeuksellisen suurilla kansallisilla yritystuilla saattoi olla iso vaikutus tehtaan sijoituspaikan valinnassa.

Porin Kupariteollisuuspuistossa Luvata, Aurubis ja Cupori jalostavat Bolidenin tuottamasta kuparista hyvän sähkö- ja lämmönjohtokyvyn omaavia kuparituotteita ja -profiileja. Yritysten erityisosaamiseen kuuluu hapettoman kuparin valmistaminen. Sitä käytetään erityisesti hyvää sähköjohtokykyä vaativissa komponenteissa. Luvata ja Aurubis valmistavat erilaisia virtakiskoja ja -johtimia sekä jäähdytyslementtejä myös autoteollisuudelle. Luvata on ensimmäisenä kuparituottajana kehittänyt valmistusmenetelmän pienelle johdinputkelle, jolla voidaan toteuttaa sisäisesti nesteellä tai ilmalla jäähdytetty segmentoitu staattorikäänitys. Näin sähkömoottorin lämpötila saadaan nykyistä paljon alhaisemmaksi, jolloin kestopagneettimoottorin suorituskyky kasvaa ja samalla voidaan käyttää halvempia NdFeB-magneetteja, joissa terbiumin ja/tai dysprosiumin pitoisuus on alhaisempi.

Kupariteollisuuspuiston naapurissa Outotec kehittää metallienjalostusteknologiaa myytäväksi niin kotimaisille kuin kansainvälisillekin markkinoille. Porissa sijaitsee Outotecin tutkimuskeskus, jossa uusia hydro- ja pyrometallurgisia prosesseja suunnitellaan ja testataan sekä jo olemassa olevia kehitetään eteenpäin. Outotec tarjoaa akkumetallien, kuten nikkelin, koboltin ja litiumin jalostusprosesseja, metallikemikaalien ja prekursorien valmistusprosesseja sekä lisäksi akkujen kierrättämiseen soveltuvia prosesseja. Yhtiö vastaa kokonaisten tuotantoprosessien ja -linjojen suunnittelusta ja rakentamisesta asiakasyrityksen raaka-aineisiin sopivaksi räätälöitynä.

Kokemällä toimiva Berner Chemicals valmistaa magnesiumkemikaaleja mm. metallien ja metallikemikaalien valmistus- ja kierrätysprosesseihin. Yhtiö kehittää myös magnesiumin kiertotaloutta. Raaka-aineena tullaan käyttämään magnesiumpitoisia sivu- ja jätevirtoja, joilla vähennetään riippuvuutta Kiinan hallitsemasta markkinasta. Kokemällä valmistettua magnesiumhydroksidia voidaan käyttää sulfaattipitoisten metallisakkojen neutralointiin ja puhdistukseen. Sivutuotteena syntyvästä magnesiumsulfaatista Berner Chemicals voi edelleen jalostaa markkinoiden tarvitsemia tuotteita.

Fortum on panostanut merkittävästi akkujen kierrättämiseen ostamalla alan liiketoimintaa. Vuonna 2018 Fortum osti Fincumet Oy:n, jolla on akkujen purkamiseen liittyvää osaamista Ikaalisissa. Vuoden 2020

alussa Fortum osti akkumetallien kierrättämiseen erikoistuneen Crisolteq-yhtiön, jolla on teollisen mittaluokan hydrometallurginen nikkelin, koboltin ja mangaanin kierrätysprosessi Harjavallan Suurteollisuuspuistossa. Hydrometallurgisella prosessilla saadaan suurempi osa akun arvokkaista metalleista talteen kuin perinteisemmällä pyrometallurgisella prosessilla. Fortum on tehnyt sopimuksen BASF:n ja Nornickelin kanssa akkujen kierrättämiseen liittyvästä yhteistyöstä Harjavallassa.

Kestomagneetteja Ulvilassa valmistava Neorem Magnets ei toimita magneetteja autoteollisuuden moottoreihin. Autoteollisuuden toimitukset konsernissa hoitaa saksalainen emoyhtiö Vacuumschmelze, joka on sertifioitunut autoteollisuuden toimittajaksi. Magneettien kierrättämisprosessia kehittänyt Neorem Magnets voisi kuitenkin olla kiinnostunut käytöstä poistettujen kestomagneettimoottorien magneettien kierrättämisestä, jos kierrättämisestä saadaan tulevaisuudessa laajamittaista ja hyvin organisoitua toimintaa.

5.1. Satakunnan teknologiametalliklusterin uusia mahdollisuuksia ja haasteita sähköautoliiketoiminnassa

Sähköautojen tuotantomäärien kasvu lisää merkittävästi akuissa, sähkömoottoreissa ja voimansiirrossa käytettyjen metallien kysyntää. Raaka-aineiden saatavuus tulee olemaan haaste ja todennäköinen pullonkaula sähköautojen valmistuksessa. Kilpailu raaka-aineista nostaa metallien hintoja, mikä puolestaan käynnistää uusia kaivoshankkeita ja investointeja tuotantokapasiteettien laajentamiseen. Tämä tarjoaa kasvumahdollisuuksia metalliteollisuudelle, mutta myös uusia projektimahdollisuuksia Outotecille.

Akkujen kehitystrendeissä on selvästi nähtävissä siirtymä, jossa pyritään mahdollisimman vähän kobolttia sisältäviin akkukemioihin. Koboltin vähentäminen lisää suoraan nikkelin kulutusta, mikä puolestaan lisää painetta nikkelituotannon kasvattamiselle. Nikkelin lisääntyvä jalostaminen akkuteollisuudelle tulee olemaan tulevaisuuden suuri kasvumahdollisuus niin Nornickelille kuin Bolidenillekin, joka rikastaa nikkelikiveä nikkelinjalostajien raaka-aineeksi. Akkumateriaaliteollisuuden edelleen laajentuessa Satakunnassa BASF:n pre-katodimateriaalitehtaan tulon myötä, on mahdollista tavoitella pidemmälle menevää akkumateriaalien jalostusta ja jopa akkukennojen valmistusta Satakunnan alueelle. Salosta Varsinais-Suomesta löytyy jo Valmet Automotiven akkujen kokoonpanotehdas, joka käynnistyi vuoden 2020 alussa. Valmet Automotive valmistaa sähköautoja Uudessakaupungissa sopimusvalmistajana useille eri automerkeille.

Sähköauton akku sisältää myös kuparia, lähes yhtä paljon kuin nikkeliä. Kuparia on anodilla ohuena virrankeräysnauhana, mutta myös akkukennojen välisinä virtajohteina ja akkumoduulien välisinä virtakiskoina. Erityisesti näiden johtimien ja kiskojen valmistus soveltuu satakuntalaiseen kuparintuotantoon. Jos alueella olisi myös anodin virrankeräysnauhana käytetyn ohuen kuparifolion valmistusta, näyttäytyisi ympäristö erittäin houkuttelevana myös akkukennojen tuotannolle. Euroopan ensimmäinen akkuihin 6-12 µm paksua kuparifolia valmistava tehdas nousee Unkariin Etelä-Korealaisen Doosanin toimesta. Tehtaan on määrä käynnistyä vuonna 2020. Tilaa Euroopassa olisi varmasti useammallekin tuotantolaitokselle, kun samaan aikaan kuparifolia tarvitsevia kennotehtaita on suunnitteilla toista kymmentä ympäri Eurooppaa. Kuparifolion valmistus tapahtuu elektrolyytisesti, eikä prosessi ole suoraan Porissa sijaitsevien kuparituotevalmistajien ydinosamaisalueelle.

Moottoreissa kehitys kohti kestopagneettimoottoreita on riippuvaista raaka-aineiden saatavuudesta. Suurvaltapoliitiikan välineenäkin toimivia metalleja ei välttämättä haluta käyttää, koska tuotantoketjun hallinta ei silloin ole riittävän hyvää. Magneettien saatavuusriskien minimoimiseksi induktio-moottorit ovat varmasti vielä pitkään mukana tuotannossa. NdFeB magneettien ja harvinaisten maametallien kierrätysmenetelmien kehittäminen pienentää saatavuusriskiä ja siten helpottaa autoteollisuuden siirtymistä kohti tehokkaampaa moottoriteknologiaa. Satakuntaan on jo kertynyt osaamista magneettien kierrättämisestä pulveroimalla ja osaamista voisi laajentaa harvinaisten maametallien kierrättämiseen metalleina. Samoin osaamista voisi laajentaa sähköautojen kestopagneettimoottoreiden purkamiseen ja magneettien talteenottoon.

Voimansiirrossa kuparikaapeleita voidaan korvata alumiinisilla alhaisemman hinnan vuoksi. Alumiini on myös kevyempää kuin kupari, mutta vastaavasti vie enemmän tilaa eikä ole yhtä kestävää. Sähköisten liitosten tekeminen alumiiniin on myös huomattavasti hankalampaa kuin kupariin. Kuparin ja alumiinin hintakehitykset määrittelevät osaltaan sen, kumpaa materiaalia johtimissa käytetään. Tilansäästön tarve ja muut kuparin edut saattavat kuitenkin johtaa kuparin valitsemiseen johdinmateriaaliksi kalliimmasta hinnasta huolimatta. Kuparijohtimien markkinan suuruus sähköautojen voimansiirrossa on siis vielä epävarma. Erilaisissa signaalikaapeleissa kupari ei kuitenkaan ole korvattavissa ja erilaisten sensoreiden määrän kasvaessa esimerkiksi autonomisissa autoissa, kasvaa myös kuparijohtimien tarve.

Akkujen kierrättämisessä on paljon potentiaalia satakuntalaiselle teollisuudelle. Kierrätysmarkkinat ovat vielä toistaiseksi varsin vähäiset, mutta kasvavat vähitellen sähköautojen yleistyessä. Akkujen purkaminen ja niiden sisältämien metallien kierrättäminen uusien akkujen raaka-aineeksi onnistuu parhaiten siellä, missä raaka-ainevalmistusta on jo entuudestaan. Harjavallan suurteollisuuspuistossa on jo olemassa prosessi akkujen mustan massan kierrättämiseen. Prosessia on hyvä kehittää ja skaalata kierrätettävän materiaalin lisääntyessä. Myös pre-katodimateriaalitehtaalla syntyvä materiaali, joka ei täytä katodimateriaalille asetettuja laatustandardeja, voidaan palauttaa kierrätysprosessin kautta raaka-ainetasolle uudelleen hyödynnettäväksi. Ongelmia akkujen kierrätyksessä voi aiheutua erilaisista akkukemioista. Akkujen jäljitettävyyden on siten avainasemassa akkujen kierrättämisessä.

Ympäristökysymykset, erityisesti natriumsulfaatti, saattaa aiheuttaa ongelmia metallurgisen teollisuuden laajentumiselle, sillä vesistöjen sulfaattikuormitus on jo olemassa olevan teollisuuden vuoksi runsasta. Natriumhydroksidin korvaaminen magnesiumhydroksidilla poistaisi sulfaattiongelman, kun metallien saostuksessa syntyvä magnesiumsulfaatti olisi käyttökelpoinen sivutuote, eikä jäte, kuten natriumsulfaatti. Magnesiumhydroksidin käyttö on monissa tapauksissa jo lipeää edullisempaa. Kasvanut tuotanto on monipuolistanut tarjontaa. Myös pienempi käyttömäärä ja syntyvän sivutuotteen hyödyntäminen läjittämisen sijaan parantavat magnesiumhydroksidin käytön taloudellisuutta. Magnesiumhydroksidin valmistusta ja siihen liittyvää osaamista löytyy Satakunnasta.

Tulevaisuuden sähköautot saattavat kulkea myös vedyllä, joka muutetaan polttokennojen avulla sähköksi. Vetyautoja on vielä verraten vähän ja niiden yleistymistä rajoittaa vedyn tankkausasemaverkoston puute. Vetyautoissa akkukapasiteetin tarve on huomattavasti vähäisempää, kuin täyssähköautoissa, joten vetyautojen yleistymisellä saattaisi olla vaikutusta akkumetallien kysynnän kasvuun. Vetyautojen määrä ei kuitenkaan tule kasvamaan niin nopeasti, että sillä olisi käytännön merkitystä akkuteollisuuden kasvuodotuksille lähitulevaisuudessa.

Sähköautojen yleistyminen luo painetta myös latausinfrastruktuurin laajentamiselle. Latauspaikkojen määrä tulee kasvamaan merkittävästi lähitulevaisuudessa. Latausinfrastruktuuri on myös voimakkaan kehittämisen kohteena, sillä pitkiä latausaikoja pyritään saamaan lyhyemmiksi kehittämällä pikalataustekniikoita. Kuparituotteilla tulee olemaan merkittävä asema näissä latausasemissa niin hyvän sähkönjohtavuutensa kuin myös lämmönjohtavuutensa vuoksi. Pikalataus vaatii myös kunnollista jäähdytysjärjestelmää toimiakseen turvallisesti. Latausinfraassa on nähtävissä merkittävää kasvupotentiaalia satakuntalaiselle teollisuudelle.

Satakunnassa on houkutteleva toimintaympäristö uudelle sähköautoihin materiaaleja, kemikaaleja ja komponentteja valmistavalle teollisuudelle. Alueella toimii merkittävä teknologiametalliklusteri, jonka teollisuuspuistojen energia-, kaasu-, kemikaali- ja logistiikkajärjestelmiin on investoitu merkittävästi viime vuosina. Tehokas infra, osaava kansainvälinen yritysverkosto ja valmistusketjujen synergiaedut ovat selkeitä vetovoimatekijöitä uusille sähköautotoimijoille Satakuntaan. Samalla uudet toimijat myös vahvistavat olemassa olevaa klusteria. Esimerkkejä tästä ovat mm. BASF, Fortum/Crisoltec ja Berner Chemicals Oy. Satakunnassa on myös vahva automaatioteollisuuden keskittymä, joka pystyy tarjoamaan akkuteollisuudelle sen tarvitsemia automaatiotratkaisuja.

6. Yhteenveto ja johtopäätökset

Vuonna 2030 uusia sähköautoja valmistetaan todennäköisesti 20-30 miljoonaa kappaletta. Kasvu sähköautojen markkinaosuudessa tulee olemaan merkittävä: nykyisestä reilusta 2 prosentista noin 20-30 prosenttiin kymmenen seuraavan vuoden aikana. Sähköautotuotannon kymmenkertaistuminen tarkoittaa myös komponenttituotannon ja niihin tarvittavien teknologiametallien tuotannon kymmenkertaistumista. Suurin muutos koskee akkujen valmistusta, joka onkin voimakkaassa investointiaallossa. Vuoteen 2019 mennessä on julkistettu investointeja akkutehdashankkeisiin eri puolilla Eurooppaa 300 GWh kapasiteettia vastaavan akkukennojen vuosituotannon verran. Näistä tehtaista riittää akkuja yli kolmeen miljoonaan sähköautoon. Osa tehtaista on jo käynnistynyt, mutta suurin osa on vasta rakenteilla tai suunnitteilla.

2030-luvulla käytetään todennäköisesti litiumiin perustuvia akkuja. NCA- ja NCM-akkukemiat kehittyvät kohti vähemmän kobolttia sisältäviä yhdisteitä. Litiumin tarve ja kysyntä kasvavat akkujen valmistusmäärien kasvaessa, nikkelin tarve lisääntyy kobolttin vähenemisen myötä. 30 miljoonan sähköauton globaali vuosituotanto tarkoittaisi akkumetallien tuotannossa merkittäviä lisäyksiä nykytilanteeseen. Riippuen käytetystä akkukemiasta kobolttin vuosituotannon on kasvettava 100 – 400 %, litiumtuotannon 460 % ja nikkelin tuotannon 60 – 90 % vuoden 2018 tuotantomääristä. Tulevaisuuden solid-state-akuissa litiumioni toimii todennäköisesti edelleen varauksenkuljettajana, joten mahdollinen kiinteään elektrolyyttiin siirtyminen ei tule vaikuttamaan metallien tarpeisiin akkuvalmistuksessa.

Akkujen tuotantomäärien kasvaessa uusien akkukemioiden ja valmistusmenetelmien käyttöönotto kustannustehokkaasti todennäköisesti vaikeutuu. Prosessit vakiintuvat ja samoin tuotteet. Tämä helpottaa kierrättämisprosessien kehittämistä, kun käytetyt akkukemioiden vaihtelut vähenevät.

Kuparin tarve sähköjohteena tulee säilymään tulevaisuudessakin. Alumiini voi korvata kuparin sähkönjohteena niissä tilanteissa, joissa hinnalla ja keveydellä on enemmän vaikutusta kuin tilansäästöllä.

ja johtimen muokattavuudella. Kaikissa kohteissa kupari ei ole korvattavissa. Moottoriteknologiassa siirrytään kohti kestopagneettimoottoreita, mutta trendi voi kääntyä, jos harvinaisten maametallien saatavuudessa ilmenee ongelmia.

Kaikkia kehitystrendejä ei voi varmaksi ennustaa, sillä raaka-aineiden hinnat vaikuttavat teollisuuden valitsemiin polkuihin, samoin yhteiskunnalliset muutokset ja kuluttajien toiveet. Uuden metallituotannon rakentaminen kaivoksista lähtien on hidasta, eikä se siten mahdollista nopeita muutoksia sähköautotuotannon volyyymeissä. Autoteollisuus etsii myös jatkuvasti teknologisia vaihtoehtoja, joilla kalliit ja saatavuudeltaan epävarmat materiaalit voidaan korvata.

Sähköautojen yleistyminen on kuitenkin trendi, joka tulee jatkumaan pitkälle tulevaisuuteen. Tämä kehitys tuo monenlaisia kasvun mahdollisuuksia satakuntalaiselle teknologiametalliklusterille. Alueen metallien jalostustoiminta on avainasemassa mahdollistamassa Euroopan autoteollisuuden siirtymistä kohti sähköautojen tuotantoa. Satakunta on houkutteleva sijoittumiskohde alan uudelle teollisuudelle sen tarvitsemien materiaalivirtojen ja kierrätysmahdollisuuksien vuoksi. Alueella on myös tilaa uusille tehdasinvestoinneille sekä uutta teollista toimintaa tukevaa infrastruktuuria.

7. Lähteet

- [1] "New CEM campaign aims for goal of 30% new electric vehicle sales by 2030," IEA, 8 6 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/news/new-cem-campaign-aims-for-goal-of-30-new-electric-vehicle-sales-by-2030>.
- [2] *Niobium in Lithium Ion Batteries*. [Performance]. CBMM, 2018.
- [3] M. Pressman, "BETTER BATTERIES: TESLA IMPROVES LITHIUM-ION BATTERY TECHNOLOGY," 10 5 2017. [Online]. Available: <https://evannex.com/blogs/news/making-batteries-better-how-tesla-could-improve-electric-vehicle-lithium-ion-battery-technology>. [Haettu 2 2 2020].
- [4] M. Winter ja R. Brodd, "What are batteries, fuel cells and supercapacitors," *Chem. Rev.*, osa/vuosik. 104, pp. 4245-4269, 2004.
- [5] E. Saarikettu, "Litiumioniakun valmistus," Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu, 2009.
- [6] "What is the Function of the Separator?," [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_306_battery_separators.

- [7] "Types of Battery Cells," 24 4 2019. [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells.
- [8] "In-depth review of the Audi e-tron by Fully Charged," 25 2 2019. [Online]. Available: <https://www.xautoworld.com/audi/e-tron-review/>.
- [9] "Sähköauton tekniikkaa osa 3: Akun elinikä," 6 2 2019. [Online]. Available: <https://www.jokamies.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-3-akun-elinika/>. [Haettu 20 1 2020].
- [10] M. Pressman, "Lightning Strikes: Why the Tesla Model S is so incredibly fast," 28 8 2016. [Online]. Available: <https://evannex.com/blogs/news/lightning-strikes-why-the-tesla-model-s-is-so-incredibly-fast>. [Haettu 2 2 2020].
- [11] "Summary Of Electric Vehicle battery Cooling Systems," 11 10 2015. [Online]. Available: <https://jingweizhu.weebly.com/blog/summary-of-electric-vehicle-battery-cooling-systems>. [Haettu 20 1 2020].
- [12] A. Pesaran, Kirjoittaja, *Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-ion Batteries for Vehicle Applications*. [Performance]. National Renewable Energy Laboratory, 2013.
- [13] "Types of Lithium-ion," [Online]. Available: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion.
- [14] M. Azevedo, N. Campagnol, K. Hoffman, A. Lala ja O. Ramsbottom, "Lithium and cobalt - a tale of two commodities," McKinset&Company, 2018.
- [15] T. Ekman, "Insinööriö - Akkulaboratorio," Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2016.
- [16] J. Luukkanen, "Sähköauton tekniikkaa osa 1: Akkukemiaa," 26 8 2018. [Online]. Available: <https://www.jokamies.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-1-akkukemiaa/>.
- [17] P. Heikkilä, "Ajoneuvo litium-ioni akkupaketin käyttöönotto," Aalto-yliopisto, 2015.
- [18] "Toshiba Develops Next-Generation Lithium-ion Battery with New Anode Material," [Online]. Available: <https://www.businesswire.com/news/home/20171002006637/en/Toshiba-Develops-Next-Generation-Lithium-ion-Battery-New-Anode>.

- [19] "News Releases - Toshiba Develops Next-Generation Lithium-ion Battery with New Anode Material," [Online]. Available: https://www.toshiba.co.jp/about/press/2017_10/pr0301.htm.
- [20] "Toshiba researchers use TiNb2O7 anodes for high-energy, fast-charging, long-life Li-ion batteries for EVs," 6 6 2018. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2018/07/20180706-toshiba.html>.
- [21] N. Takami ja e. al, "High-energy, fast-charging, long-life lithium-ion batteries using TiNb2O7 anodes for automotive applications," *Journal of Power Sources*, nro 396, pp. 429-436, 2018.
- [22] M. Thackeray, J. Thomas ja S. Whittingham, "Science and Applications of Mixed Conductors for Lithium Batteries," *MRS Bulletin - Solid Electrolytes: Advances in Science and Technology*, osa/vuosik. 25, nro 3, pp. 39-46, 2000.
- [23] "Lithium-ion battery," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery. [Haettu 20 1 2020].
- [24] Trading Economics, "Manganese Ore," [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/manganese>. [Haettu 2 2 2020].
- [25] Trading Economics, "Lithium," [Online]. Available: <https://tradingeconomics.com/commodity/lithium>. [Haettu 2 2 2020].
- [26] T. L. M. Exchange, "LME COBALT," [Online]. Available: <https://www.lme.com/Metals/Minor-metals/Cobalt#tabIndex=1>. [Haettu 2 2 2020].
- [27] T. L. M. Exchange, "LME Nickel," [Online]. Available: <https://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/Nickel#tabIndex=2>. [Haettu 2 2 2020].
- [28] S. Ahmed, P. Nelson, J. Kubal ja J. Song, Kirjoittajat, *Estimated Cost of EV Batteries 2018-2019*. [Performance]. Argonne National Laboratory, 2019.
- [29] Northvolt, [Online]. Available: <https://northvolt.com/production/#northvolt-battery-systems-jeden>. [Haettu 2 2 2020].
- [30] Deutsche Welle, "VW enters partnership with Swedish battery maker Northvolt," [Online]. Available: <https://www.dw.com/en/vw-enters-partnership-with-swedish-battery-maker-northvolt/a-49165665>. [Haettu 2 2 2020].

- [31] J. Nieminen, "Tesla-johtajien perustama ruotsalainen sähköautojen akkuvalmistaja Northvolt alkaa kierrättää akkuja omaksi raaka-aineekseen," Tekniikan Maaailma, 19 12 2019. [Online]. Available: <https://tekniikanmaailma.fi/ruotsalainen-sahkoautojen-akkuvalmistaja-northvolt-alkaa-kierrattaa-akkuja-omaksi-raaka-aineekseen/>. [Haettu 2 2 2020].
- [32] "Sähköauton tekniikkaa osa 4: Akkuvalmistajat," 30 8 2019. [Online]. Available: <https://www.jokamies.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-4-akkuvalmistajat/>. [Haettu 20 1 2020].
- [33] "Toyota using Tesla-style Panasonic batteries for China hybrids: sources," 13 9 2019. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-toyota-batteries-china/toyota-using-tesla-style-panasonic-batteries-for-china-hybrids-sources-idUSKCN1VY00N>.
- [34] "Toyota and Panasonic to build electric car batteries together," 19 1 2019. [Online]. Available: <https://asia.nikkei.com/Business/Business-deals/Toyota-and-Panasonic-to-build-electric-car-batteries-together>.
- [35] "Tesla considers strategic deal with cobalt supplier to secure China battery cell production," 15 1 2020. [Online]. Available: <https://www.teslarati.com/tesla-glencore-cobalt-supplier-lithium-battery-cell-production/>.
- [36] "Tesla Gigafactory Europe," Wikipedia, 20 1 2020. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Gigafactory_Europe.
- [37] R. Zenn, "Gigafactories," 10 11 2019. [Online]. Available: <https://twitter.com/icbillywu/status/1193635240780161025>. [Haettu 12 12 2019].
- [38] V. Erkkilä, "New Energy," VTT, 2019.
- [39] "Battery Megafactory Forecast: 400% Increase in Capacity to 1 TWh by 2028," 19 10 2018. [Online]. Available: <https://www.visualcapitalist.com/battery-megafactory-forecast-1-twh-capacity-2028/>.
- [40] Adamas Intelligence, "State of Charge: EVs, Batteries and Battery Materials," 2019.
- [41] "What Engineers Found When They Tore Apart Tesla's Model 3," Bloomberg Technology, 19 10 2018. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=Lj1a8rdX6DU&t=109s>.

- [42] "Tesla's electric motor shift to spur demand for rare earth neodymium," Reuters, 12 3 2018. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/article/us-metals-autos-neodymium-analysis/teslas-electric-motor-shift-to-spur-demand-for-rare-earth-neodymium-idUSKCN1GO28I>. [Haettu 20 1 2020].
- [43] Adams Intelligence, "Electric Growth: EVs, Motors and Motor Materials," 2019.
- [44] A. Intelligence, "Spotlight on Dysprosium," 2018.
- [45] "The Secrets of Electric Cars and Their Motors: It's Not All About the Battery, Folks," 9 1 2018. [Online]. Available: <https://www.thedrive.com/tech/17505/the-secrets-of-electric-cars-and-their-motors-its-not-all-about-the-battery-folks>. [Haettu 20 1 2020].
- [46] Audi, "Electrifyingly fun to drive: the Audi e-tron," Audi Media Center, 18 9 2018. [Online]. Available: <https://www.audi-mediacenter.com/en/press-releases/electrifyingly-fun-to-drive-the-audi-e-tron-10733>. [Haettu 2 2 2020].
- [47] F. Lambert, "Tesla Model 3: supplier says it received an order for 3,000 km of 'shielded aluminum cables' from Tesla," 21 3 2017. [Online]. Available: <https://electrek.co/2017/03/21/tesla-model-3-shielded-aluminum-cable/>. [Haettu 2 2 2020].
- [48] *Copper intensity in the electrification of transport and the integration of energy storage*. [Performance]. IDTechEx, 2017.
- [49] GKN Automotive, "GKN'S NEXT-GENERATION ELECTRIC VEHICLE DRIVELINE NOW IN PROTOTYPE TEST PHASE," 1 3 2018. [Online]. Available: <https://www.gknautomotive.com/en/company/media-centre/news-releases/2018/gkns-next-generation-electric-vehicle-driveline-now-in-prototype-test-phase/>. [Haettu 2 2 2020].
- [50] "Koeajo: Audin sähköinen lippulaiva on vakuuttava ja osoittaa perinteisen autotalon vahvuudet," Kauppalehti, 21 4 2019. [Online]. Available: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/audin-ensimmaisen-sahkoauton-laatuvaikutelma-on-huikaa-e-tron-osoittaa-perinteisen-autotalon-vahvuudet/9cf7c412-b431-4df0-acbe-509449b9f7d4>. [Haettu 20 1 2020].
- [51] "Electric Cars Are About to Get a Lot Faster and Go a Lot Further on a Charge," 29 11 2017. [Online]. Available: <https://www.thedrive.com/sheetmetal/16516/electric-cars-are-about-to-get-a-lot-faster-and-go-a-lot-further-on-a-charge>. [Haettu 20 1 2020].

- [52] "High-Nickel Cathodes Making Headway in Passenger EV Market," 21 6 2019. [Online]. Available: <https://www.adamasintel.com/ncm-811-deployment-on-rise/>.
- [53] IEA, "Global EV Outlook 2019," IEA, 2019.
- [54] "BETTER BATTERIES: TESLA IMPROVES LITHIUM-ION BATTERY TECHNOLOGY," 10 5 2017. [Online]. Available: <https://evannex.com/blogs/news/making-batteries-better-how-tesla-could-improve-electric-vehicle-lithium-ion-battery-technology>. [Haettu 20 1 2020].
- [55] J. Laurikko ja M. Paakkinen, "Sähkö- ja kaasuautojen markkinanäkymät Suomessa (GASELLI) - Väliraportti 2," VTT, Espoo, 2018.
- [56] "The EV revolution is here. Here are the hottest electric cars of 2019!," 6 11 2018. [Online]. Available: <https://blog.evbox.com/electric-cars-2019>. [Haettu 20 1 2020].
- [57] "MODEL X 90D "DEUXY" ACHIEVES 300,000 MILES IN LESS THAN TWO YEARS," 2 8 2018. [Online]. Available: <https://www.tesloop.com/blog/2018/8/2/model-x-90d-300000-miles-in-two-years>. [Haettu 20 1 2020].
- [58] "TESLOOP'S TESLA MODEL S SURPASSES 400,000 MILES (643,737 KM)," 16 7 2018. [Online]. Available: <https://www.tesloop.com/blog/2018/7/16/tesloops-tesla-model-s-surpasses-400000-miles-643737-kilometers>. [Haettu 20 1 2020].
- [59] S. Ahmed, K. Gallagher, P. Nelson, N. Susarla ja D. Dees, "BatPac model development and implementation," Argonne National Laboratory, Washington, 2016.
- [60] U. G. Survey, "Mineral Commodity Summaries 2019," U.S. Geological Survey, Reston, 2019.
- [61] "Lithium Ion Battery Key Elements — More Than Just Lithium," CEMAC, 13 4 2016. [Online]. Available: <https://www.manufacturingcleanenergy.org/blog-20160413.html>.
- [62] *Hautalammen Koboltti-Nikkeli-Kuparikaivos-projekti*. [Performance]. Finncobalt, 2019.
- [63] Shanghai Metals Market, "SMM news.metal.com," 2 11 2018. [Online]. Available: <https://news.metal.com/newscontent/100909562/industrial-teeth-new-energy-monosodium-glutamate-this-encyclopedia-of-the-industrial-chain-is-worth->

reading-carefully-before-the-next-time-%22cobalt-bull%22-comes/. [Haettu 2 2 2020].

- [64] J. Dunn, L. Gaines, M. Barnes, J. Sullivan ja M. Wang, "Material and Energy Flows in the Materials Production, Assembly, and End-of-Life Stages of the Automotive Lithium-Ion Battery Life Cycle," Argonne National Laboratory, 2012.
- [65] M. Burton ja E. van der Walt, "Electric vehicles shake up the biggest metals markets," Blommborg News, 3 8 2017. [Online]. Available: <https://www.theglobeandmail.com/globe-investor/investment-ideas/electric-vehicles-shake-up-the-biggest-metals-markets/article35875336/>.
- [66] "Battery collaboration meeting discusses new pathways to recycle lithium-ion batteries," 10 12 2019. [Online]. Available: <https://www.technology.org/2019/12/10/battery-collaboration-meeting-discusses-new-pathways-to-recycle-lithium-ion-batteries/>. [Haettu 20 1 2020].
- [67] S. Zhu, "Game of Mines," Reuters, 7 7 2019. [Online]. Available: <http://graphics.reuters.com/ELECTRIC-VEHICLES-METALS/010092JB38P/index.html>. [Haettu 2 2 2020].
- [68] J. Valio, "Akkuekosysteemi - nykytilaselvitys," Pirkanmaan liitto, 2018.
- [69] "EV Makers Have A New Favorite Metal," [Online]. Available: <https://oilprice.com/Energy/Energy-General/EV-Makers-Have-A-New-Favorite-Metal.html>.

8. Liitteet

- A. Akkupaketin kustannusjakauma
- B. Akkumetalliesiintymät

Liite A. Akkupaketin kustannusjakauma [28]

2019 modeled cost of a 300 mile EV battery pack: \$185/kWh

The current cost estimate of \$185 per kilowatt-hour of useable energy, is derived using the peer reviewed and publicly available BatPaC battery cost modeling software developed at Argonne National Laboratory. (See attachment for an overview of the BatPaC model.) Two DOE-funded battery developers have submitted EV battery cost estimates, using the USABC battery cost model, in this same range. The cost is based on a production volume of 100,000 batteries per year, and is derived for batteries that are projected to meet DOE performance targets, including the 1,000 cycle life requirement.

Specific battery details are shown immediately below and in the following slides.

- NMC622 cathode, Graphite based anode
- 94 kWh_{total}/80 kWh_{usable}
- 200 kW
- 400 cells
- No fast charge - 56 minutes to charge from 15% to 95% SOC

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Argonne

More design parameters and material price assumptions

2019 Battery cost for a 300 mile electric vehicle

NMC622-Graphite, 94 kWh _{total} , 80 kWh _{usable} , 200 kW		NMC622-Graphite, 94 kWh _{total} , 80 kWh _{usable} , 200 kW	
NMC622, \$/kg	\$21.00	Number of Cells (100S 4P)	400
NMC622, mAh/g	175	Number of Modules	20
Graphite, \$/kg	\$14.00	Charge time to Δ80% SOC, min	56
Graphite, mAh/g	350	Cathode Thickness*, μm	72
Electrolyte, \$/L	\$15.00	Cell Yield, %	85
Separator, \$/m ²	\$1.10	Production Volume, packs per year	100,000
Aluminum Current Collector, \$/m ²	\$0.40		
Copper Current Collector, \$/m ²	\$1.20		
PVDF binder, \$/kg	\$10.00		
NMP solvent, \$/kg	\$3.10		
Max. Charging Current Density, mA/cm ²	6.0		
Cell Voltage, V	3.75		

Useable Energy = 85% of Total Energy

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

*Specified

Argonne

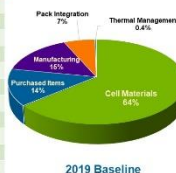
Cell materials represent 64% of the 2019 pack cost

Pack Cost to OEM, \$	\$14,814	% of Total
Pack Cost to OEM, \$/kWh	\$185	
Cell Materials	\$9,482*	64.0%
Purchased Items	\$2,081*	14.1%
Manufacturing	\$2,266*	15.3%
Electrode Processing	660	4.5%
Cell Assembly	419	2.8%
Formation Cycling, Testing, Sealing	531	3.6%
Module and Battery Assembly	325	2.2%
Cell Materials Rejection/Recycle	33	0.2%
Receiving and Shipping	244	1.6%
Control Laboratory	54	0.4%
Pack Integration (BMS, ...)	\$945	6.4%
Thermal Management	\$40	0.3%

*Includes overhead

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Argonne



2019 Baseline

Cell Purchased Items are 18% of the 2019 pack cost

There are 400 cells and 20 modules in the pack

Purchased Items	\$1,951*	% of Total
Cell Purchased Items	\$353	18.1%
Module	\$789	40.4%
Pack	\$809	41.5%

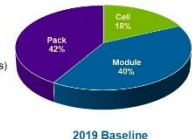
Purchased Items include

- Cells: Terminal assemblies, Cell containment, \$0.88 per cell (400 cells)
- Module: Conductors, SOC regulator, terminals, gas release valve, module containment
- Battery Pack: Module connectors, compression plates, straps, pack terminals, bus bars, thermal system, pack jacket

*Costs in the table exclude 6.6% overhead

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Argonne



2019 Baseline

Cathode active material is 42% of 2019 materials cost

The NMC622, graphite, separator, and electrolyte adds up to 83% of material cost

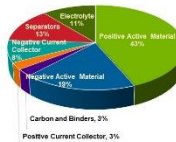
Cell Materials	\$8,890*	% of Total
Positive Active Material	\$3,864	43%
Negative Active Material	\$1,663	19%
Carbon and Binders	\$240	3%
Positive Current Collector	\$237	3%
Negative Current Collector	\$749	8%
Separator	\$1,158	13%
Electrolyte	\$980	11%

*Costs in the table exclude 6.6% overhead

94 kWh_{total}, 100k, 70 μm cathode, 56 min from 15% to 95% SOC

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Argonne



2019 Baseline

2018 and 2019 battery cost comparisons

Based on developer input, the 2019 cost estimates use a slightly higher cell energy due to cathode thickness increase (72 vs 70 microns), slightly improved cell yield (85 vs 83%), and lower cost separator (\$1.10/m² vs 1.30/m²).

NMC622-Graphite, 94 kWh _{total} , 80 kWh _{usable} , 200 kW	2018	2019
Pack Voltage, V	375	375
Cell Capacity, Ah	63	63
Specific Energy (Cell), Wh _{total} /kg	220	227
Specific Energy (Pack), Wh _{total} /kg	169	174
Energy Density (Cell), Wh _{total} /L	509	525
Energy Density (Pack), Wh _{total} /L	298	306
Cell Cost, \$/kWh _{usable}	\$160	\$148
Pack Price to OEM, \$/kWh _{usable}	\$197	\$185
Pack Price to OEM, \$	\$15,761	\$14,814
Pack to Cell, \$/S	1.24	1.22

Useable Energy = 85% of Total Energy

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Downloaded From: 10/10/2018 10:01:11 AM

Argonne

Liite B. Akkumetalliesiintymät [67]

