



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Niko Parta

Sähköajoneuvojen akkuteknologia nyt ja tulevaisuudessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

23.11.2020

Tekijä Otsikko	Niko Parta Sähköajoneuvojen akkuteknologia nyt ja tulevaisuudessa
Sivumäärä Aika	26 sivua 23.11.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Autosähkötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Pasi Kovanen
<p>Tässä insinööriytyössä tutkitaan sähköajoneuvojen litiumakkuteknologian kehittymistä ja kerrotaan kolmesta tulevaisuuden akkukemiasta. Insinööriytyön tavoitteena on selvittää lukijalle akkujen toimintaperiaate, niiden rakenne ja vertailla olemassa olevia litiumioniakkukemioita sekä luoda katsaus mahdollisista tulevaisuuden sähköajoneuvojen akkuteknologioista.</p> <p>Työssä kerrotaan ensiksi akuista yleistä tietoa, minkä jälkeen tarkastellaan litiumakun toimintaperiaatetta. Näiden jälkeen perehdytään rakennetasolla katodiin, anodiin sekä kolmeen eri akunkennomuotoon, joita käytetään yleisesti sähköajoneuvoissa. Seuraavaksi työssä kuvataan kolme eri akkuteknologiaa, jotka löytyvät tällä hetkellä markkinoilla olevista sähköajoneuvoista ja vertaillaan niiden teknisiä ominaisuuksia sekä hyviä ja huonoja puolia. Tämän jälkeen perehdytään kolmeen mielenkiintoiseen mahdollisesti tulevaisuudessa nähtävään akkuteknologiaan, jotka ovat kiinteän elektrolyytin litiumakut, litium-rikki- sekä litium-piiaakku. Viimeisenä työssä on pohdintaa akkujen kehittymisestä ja tulevaisuudesta.</p> <p>Työ on tehty kirjallisuustutkimuksena, ja sen pääpaino on sähköajoneuvojen akkuteknologia nyt ja tulevaisuudessa.</p> <p>Tässä työssä päädytään tulokseen, että akkuteknologia on jatkuvasti kehittymässä eteenpäin tuoden markkinoille uusia ratkaisuja, jotka edistävät sähköajoneuvojen yleistymistä. Tutkijoilla riittää silti vielä lukuisia haasteita uusien teknologioiden kehittämisessä, ennen kuin ne saadaan sarjatuotantoon, sillä useassa teknologiassa oli havaittavissa kestävyysongelmia. Akun lataus-purkusykliden aikana elektrodien tilavuuden muutos aiheuttaa kennojen ennenaikaisen rikkoutumisen.</p>	
Avainsanat	sähköajoneuvo, akkuteknologia, litiumioniakku

Author Title	Niko Parta Electric car battery technology now and in future
Number of Pages Date	26 pages 23 November 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive engineering
Professional Major	Automotive Electronics Engineering
Instructors	Pasi Kovanen, Lecturer
<p>This thesis focus on the development of lithium battery technology in electric vehicles and brings up three interesting future technologies. The aim of this research is to explain the functions of the batteries, their structure and compare existing lithium-ion battery chemistry as well as to create an overview of future electric vehicle battery technology. The thesis has been made as a literature research and the main point is to get into the technologies now and in the future.</p> <p>At first the research explains the general information about the batteries and after that gets deeper in the function of lithium-ion battery. Secondly, the cathode and anode as well as the three different battery cell structures which are used in electric vehicles are introduced at the structural level. The third part of the thesis focus to the battery technologies which are used in the electric vehicles and compares their technical features. This is followed by an introduction to three interesting battery technologies that may be seen in the future and a comparison of their technical properties. At last in the research is my own reflection on the development of the batteries.</p> <p>This report concludes that battery technology is constantly evolving, bringing new solutions to the market to promote the breakthrough of electric vehicles. There are still numerous challenges for researchers in developing new technologies before they are brought to market.</p>	
Keywords	Electric car, Battery technology, Lithiumion

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taustatietoa akuista	1
2.1	Yleistä tietoa akuista	1
2.2	Akku	4
2.2.1	Rakenne	5
2.2.2	Katodi	6
2.2.3	Anodi	7
2.3	Akkujen kennot	7
2.3.1	Sylinterikenno	7
2.3.2	Prismaattinen kenno	9
2.3.3	Pussikenno	9
3	Akkuteknologian nykytilanne	11
3.1	Eri akkuteknologiat	11
3.1.1	NCA	11
3.1.2	NMC	12
3.1.3	LMO	13
3.2	Vertailu	14
4	Akkuteknologia tulevaisuudessa	16
4.1	Eri akkuteknologiat	16
4.1.1	Litium solid-state	16
4.1.2	Li-S	20
4.1.3	Li-Si	21
4.2	Vertailu	22
5	Yhteenveto	23
	Lähteet	24

Lyhenteet

Akku	Uudelleenvarattava jännitelähde
Akusto	Useita kennoja yhdistettynä toisiinsa
AGM	Absorbent Glass Mat
BMS	Battery Management Service
Ioni	Sähköisesti varautunut atomi tai molekyyli
LMO	Litium-mangaanioksidi
Li S	Litium-rikki
Li Si	Litium-pii
NCA	Litium-nikkeli-alumiinioksidi
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi
PTC	Positive Thermal Coefficient, vastus
UPS	Uninterruptible Power Supply, varavirtalähde

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena on selvittää sähköajoneuvojen litiumakkuteknologian kehittymistä tähän päivään saakka ja luoda käsitys, minkälainen tulevaisuus litiumakkujen kehittymisellä nähdään. Selvityksen pääpainona on litiumakkuteknologian nykyhetki ja tulevaisuuden tuomat ratkaisut olemassa olevien litiumakkuteknologioiden lisäksi. Näiden lisäksi työssä tehdään vertailua tutkittavien litiumakkukemioiden välillä. Tarkoituksena on luoda nykypäivää vastaava tietopaketti sähköajoneuvojen litiumakkuteknologioista ja tuoda litiumkemioiden hyvät sekä huonot puolet esiin.

Opinnäytetyö on tehty itsenäisesti kirjallisuustutkielmana. Tietoa on kerätty tutkimuksista, oppimateriaaleista, kirjallisuudesta ja raporteista. Tutkielmaan liitetään lisäksi havainnollistavia taulukkoja ja kuvia. Tavoitteena on, että työ on hyödyksi kuluttajille, tekniikan alan ammattilaisille, opetushenkilökunnalle ja opiskelijoille.

2 Taustatietoa akuista

2.1 Yleistä tietoa akuista

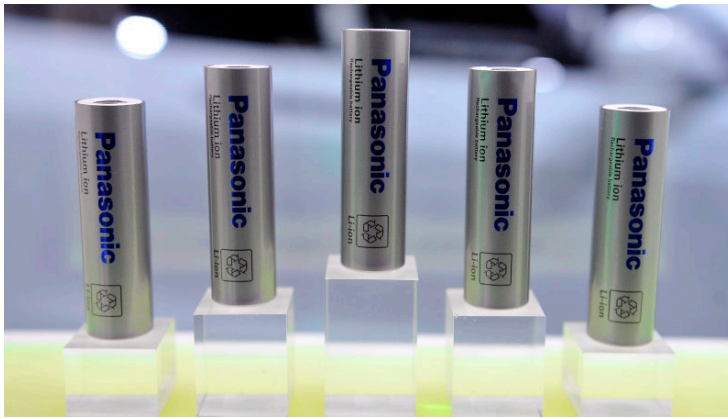
Italialainen fyysikko Alessandro Volta tuotti ensimmäisen kerran sähköä kehittämällään paristolla vuonna 1780. Vuonna 1859 Gaston Plante kehitti ensimmäisen uudelleen varattavan jännitelähteen, joka perustui lyijyhappoteknologiaan. Lyijyakut vakiintuivatkin nopeasti käytettäväksi polttomoottoriajoneuvoissa käynnistysakkuna ja jännitelähteenä valoille, ja siitä muodostuikin yleisin käytettävä akkutyypin ajoneuvoissa. Lyijyakku sisältää lyijylevyjä, jotka toimivat elektrodeina, sekä nestemäisenä elektrolyyttinä toimivan happonesteen. Lyijyakun heikkoutena on sen elektrolyytinesteen kaasuuntuminen uudelleen varattaessa, jos latausta ei osaa lopettaa oikeaan aikaan. Elektrolyytinesteen haihtuessa alkaa lyijylevyt vahingoittumaan ja pahimmassa tapauksessa akku muuttuu käyttökelvottomaksi. (1; 2)

Lyijyakusta kehitellympi ja huoltovapaana tunnettu AGM-akku esiteltiin 1980-luvun alussa. Kun tavallisessa lyijyakussa elektrolyytti on nestemäisessä muodossa, AGM-

akussa elektrolyytti on imeytetty lasivillaan ja pakattu tiiviisti ilmatiiviiseen koteloon. AGM-akku tunnetaan rekombinaatioakkuna, jolla tarkoitetaan kotelon sisällä tapahtuvaa reaktiota. Reaktion avulla saadaan muodostettua vettä, jota hyödynnetään yllätauksen aikana ja näin estetään akun elektrolyytin haihtumista. Reaktion aikaansaamiseksi akkukotelon sisälle muodostuu painetta, joka ei saa kumminkaan nousta liian korkeaksi. Paineen noustessa liian korkeaksi on koteloihin asennettava turvallisuus syistä varoventtiili, joka päästää liian korkean paineen pois. (3)

AGM-akuilla saavutetaan perinteiseen lyijyakuun verrattuna parempi energiatiheys ja kylmäkäynnistysvirta, ja se pystyy vastaanottamaan latausta tehokkaammin. Irtonestettä sisältävä lyijyakun kuoren vaurioituminen luo myös vaaran vuotaa elektrolyytinestettä ulos ja aiheuttaa ihmisen iholle pahoja vammoja päästessään sen kanssa kosketuksiin. AGM-akku pidetään siis käyttäjälle huomattavasti turvallisempänä vaihtoehtona, koska elektrolyytti on imeytetty lasivillaan, ja näin ei ole vuodon mahdollisuutta akun kuoren vaurioituessa. (4)

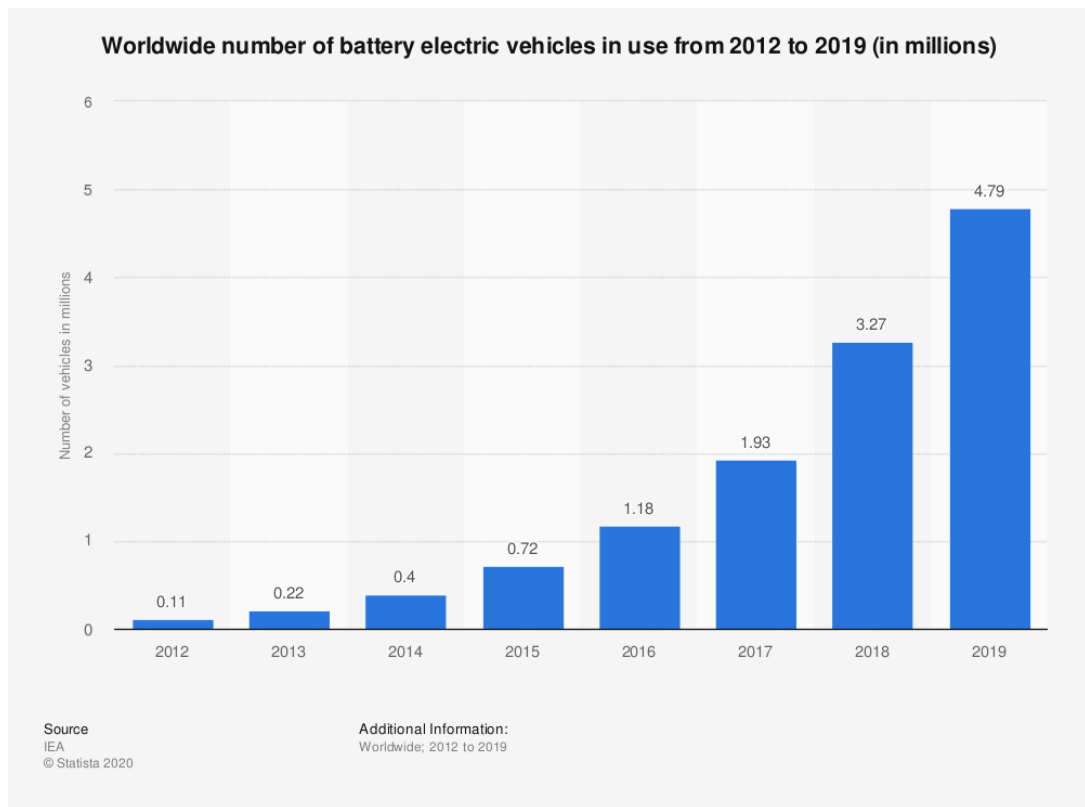
Lyijyakun ja AGM-akun rinnalle kaupallistettiin uuden teknologian litiumioniparisto vuonna 1962 (kuva 1). Ensimmäiset litiumioniparistot olivat vielä kertakäyttöisiä, koska niitä ei voitu uudelleen varata. Vasta vuonna 1991 markkinoille tuotiin Sonyn valmistama ensimmäinen turvallinen uudelleen varattava litiumioniakku, joiden käyttökohde oli pienet elektroniikka laitteet. Nopeasti litiumioniakut päätyivätkin tutkijoiden kehityksen kohteeksi ja tänä päivänä se on jo käytetyin akkutyyppejä sähköajoneuvoissa, elektroniikassa ja energianvarastoinnissa. Litiumioniakuista puhuessa on tärkeää tietää, mitä akkukeemiaa se käyttää. Tavalliseen lyijyhappoakuun verrattaessa litiumioniakut tunnetaan helposti syttyvinä käytettäessä niitä väärällä tavalla. Siksi litiumioniakut tarvitsevat BMS-yksikön valvomaan niiden toimintaa. BMS-yksikkö valvoo esimerkiksi yksittäisten akkukennojen napajännitettä ja lämpötilaa sekä tasaa kennojen välistä varausta niin purkautuessa kuin ladattaessa.



Kuva 1. Panasonicin valmistama litiumioniparisto (5).

Nykyään iso osa kulutuselektronikasta suunnitellaan toimivaksi akulla, ja tähän litiumioniakku on oiva, koska sillä pystytään saavuttamaan hyvä energiatiheys pakattuna pienen kokoon. Käyttökohteita litiumioniakulle on siis lukuisia, esimerkiksi sähkötyökälyt, matkapuhelimet, UPS ja sähköajoneuvot. Kohteita ollessa niin monia on kemioitakin kehitelty useita, ja kaikki näistä saavuttaa erilaiset tekniset ominaisuudet. Soveltuvuus käyttökohteeseen riippuu suuresti kohteesta ja siinä vaadittavista ominaisuuksista. (6, s. 49.) Siksi tarkastelenkin tässä työssä erityisesti sähkö- ja hybridiajoneuvoissa käytettäviä litiumioniakkuja.

Polttomoottoreiden päästövaatimusten kiristyessä ja niiden tuottamien päästöjen minimoimiseksi on tuotu markkinoille sähkö- ja hybridiajoneuvoja, joiden jatkuva kysynnän lisääntyminen näkyy niiden kasvavassa valmistusmäärässä (6, s. 49). Vuonna 2012 sähköajoneuvoja oli maailmanlaajuisesti käytössä 110 000 kpl (kuva 2). Vuonna 2017 luku oli jo 1,93 miljoonaa kappaletta ja vuoden 2019 jo 4,79 miljoonaa kappaletta (7). Kysynnän lisääntyminen ajaa myös tutkijoita kehittämään jatkuvasti akkuteknologiaa, koska kehitys on tunnetusti ollut hidasta varsinkin akuston energiantiheyden kasvattamisen osalta.



Kuva 2. Käytössä olevien sähköajoneuvojen maailman laajuinen määrä (miljoonissa) (7).

Akuilta odotetaan enemmän, koska tällä hetkellä ne ovat varsinkin sähköajoneuvoissa jarruttava tekijä niiden läpimurrolle. Tavoitteena tutkijoilla on saada akusto tarjoamaan sähköajoneuvolle pidempi toimintasäde ja lyhennettyä sen uudelleenvaraamisaikaa kumminkaan nostattamatta akuston valmistuskustannuksia. Samalla täytyy myös pystyä takaamaan kemioiden luotettavuus ja kestävyys sekä luoda akustosta käyttäjälle turvallinen.

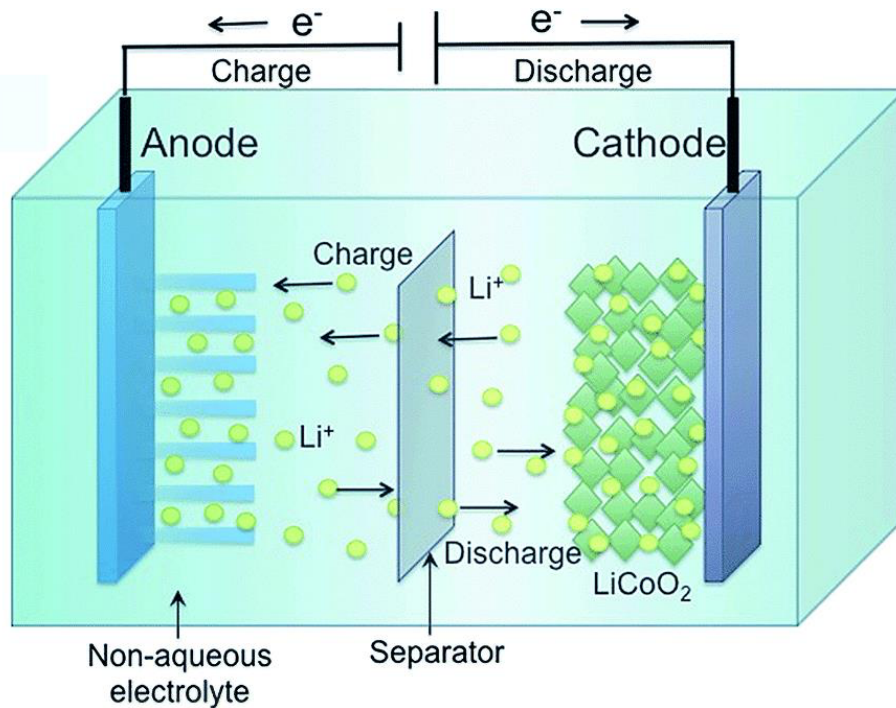
2.2 Akku

Tässä luvussa perehdytään litiumionikennon toiminnan havainnollistamiseen. Koska litiumionikemioita on erilaisia, niiden ominaisuudet vaihtelevat esimerkiksi kennossa käytettävän valmistusmateriaalin mukaan.

2.2.1 Rakenne

Akkukennon rakenne koostuu positiivisesta ja negatiivisesta elektrodista (Kuva 3), niiden välissä olevasta johtavasta materiaalista elektrolyytistä ja erottajasta. Elektrolyytti on nestemäisessä, geelimäisessä tai kiinteässä olomuodossa. Nestemäiset elektrolyytit koostuvat orgaanisista liuottimista ja litiumsuoloista. Hyvän sähkönjohtavuuden ja turvallisuuden omaavaa litiumheksafluorofosfaattia käytetään useasti litiumsuolana. (8) Kiinteään elektrolyytin valmistusmateriaalit esitetään tämän tutkielman luvussa 4, mutta pääsääntöisesti ne jakautuvat orgaanisiin ja epäorgaanisiin materiaaleihin. Elektrodien välissä oleva erottaja on kalvo, jonka tehtävänä on erottaa positiivinen ja negatiivinen elektrodi. Erottaja estää siis kennon sisäisen oikosulun tapahtumista. Usein kalvon materiaalina käytetään huokoista polyeteeniä, polypropyleeniä tai niiden sekoitetta. (9)

Litiumioniakun toimintaperiaate perustuu kemialliseen reaktioon, jossa elektroneja siirtyy elektrodeista toiseen hapettumis- ja pelkistymisreaktion avulla (kuva 3). Akun luovuttaessa virtaa tapahtuu negatiivisesti varautuneella anodilla hapettumisreaktio ja positiivisella varautuneella katodilla pelkistymisreaktio. Negatiivisesti varautuneella anodilla tapahtuvassa hapettumisreaktiossa vapautuu elektroneja, ja niiden kulkiessa ulkoisen virtapiirin kautta positiivisesti varautuneelle katodille ne saavat aikaan sähkövirran. Saapuessaan katodille elektronit saavat aikaan pelkistymisreaktion, jossa anodilta katodille siirtyneet ionit ovat vastaanottamassa elektroneja. Taas akkua varattaessa uudelleen alkaa hapettumisreaktio katodilla, josta elektronit jatkavat matkaa anodille. Anodilla tapahtuu silloin pelkistyminen, eli akkua uudelleen varattaessa hapettumis-pelkistymisreaktio tapahtuu toisin päin kuin akkua purettaessa. Elektronien liikehdintää anodin ja katodin välillä kennon sisällä on estämässä aikaisemmin mainittu erottaja. (10)



Kuva 3. Grafiittianodilla varustetun litiumioniakun rakenne ja toiminta (11).

Anodin ja katodin materiaalilla on suuri merkitys suunniteltaessa akkua, koska jokaisella aineella on oma teoreettinen energiatiheys. Anodin ja katodin tarkoitus kennossa on juuri varastoida elektroneja, joten käytettävällä valmistusmateriaalilla voidaan vaikuttaa paljolti esimerkiksi akun energiatiheyteen. Käytettävällä materiaalilla vaikutetaan myös akun kustannuksiin ja turvallisuuteen. Eri materiaalien tekniset rajoitukset rajoittavat myös valintaa esimerkiksi soveltuvaiseksi sähköajoneuvoihin. Sähköajoneuvokäytössä akuston on pystyttävä tarjoamaan energiaa niin $+60\text{ }^\circ\text{C}$:n lämmössä kuin $-20\text{ }^\circ\text{C}$:n pakasessa, ja näin ollen akussa käytettävällä materiaalilla on oltava hyvä lämpöstabiilius sekä johtavuus eri lämpötiloissa. (12)

2.2.2 Katodi

Hyvän katodin pitäisi pystyä varastoimaan elektroneja mahdollisimman paljon muuttamatta katodin rakennetta sen ollessa varautuneena. Rakenteellisen muutoksen tapahtuessa kennoon voi tulla halkeamia aiheuttaen sen tuhoutumisen ja tehden siitä käyttökelvottoman jo muutaman syklin jälkeen. Myös käytettävän materiaalin hankintakustannus-

ten olisi oltava alhaiset ja materiaalien turvallisuutta ajatellen mahdollisimman vähän reaktioherkkiä. Yleisimpiä katodimateriaaleja on litium-kobolttioksidi (LCO), litium-manganaattioksidi (LMO), litium-rautafosfaatti (LFP) ja tällä hetkellä sähköajoneuvoissa tunnetuimmat litium-nikkeli-mangaani-koboltti (NMC) ja litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA). (13; 14)

2.2.3 Anodi

Anodin toimiessa isäntänä akun purkautuessa olisi sen suotava saavuttaa myös hyvät tekniset ominaisuudet. Anodin täytyy myös pystyä varastoimaan ioneita mahdollisimman paljon muuttamatta rakenteellista muotoa ja kyettävä palauttamaan ne takaisin varautuessaan katodille. Anodin materiaalina tähän päivään mennessä on lähes aina ollut grafiitti koska sillä on saatu aikaiseksi tasainen purkautumiskäyrä ja kestävä rakenne kennolle. Grafiittia käyttämällä ei ole silti pystytty täyttämään tutkijoiden tavoitteen olevien suuren energiatiheuden litiumioniakkujen vaatimuksia. Grafiittia anodimateriaalina on kehitetty myös lisäämällä siihen sekoitetta esimerkiksi piitä, millä on pystytty lisäämään 20–30 % kennon energiatheyttä. Tämän vuoksi kehitetään jatkuvasti uusia sekoitteita ja etsitään uusia materiaalivaihtoehtoja anodille, joilla olisi mahdollista saada aikaan suuri energiatiheys sekä pitkä käyttöikä akulle. (13; 14)

2.3 Akkujen kennot

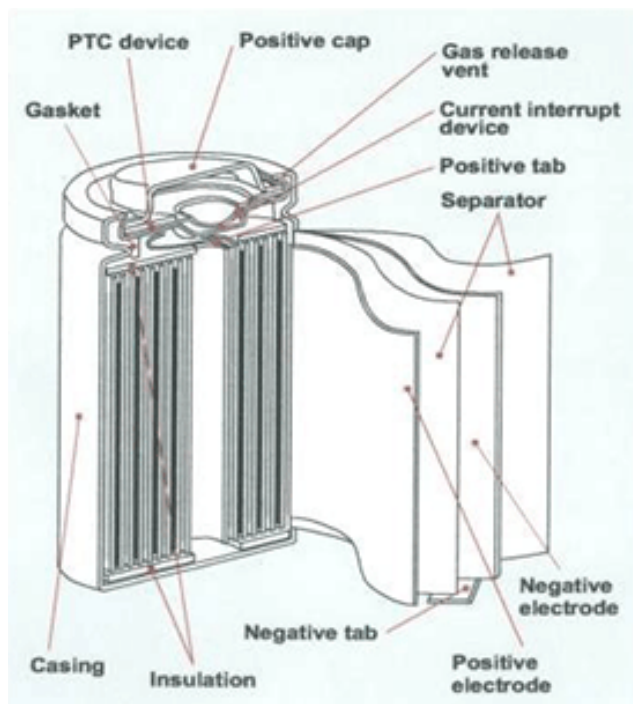
Akut jaetaan erilaisiin rakennetyyppeihin, joista suosituimmiksi ovat osoittautuneet prismaattinen, sylinterimäinen ja pussimainen rakenne, mutta lopullinen valinta rakennetyyppien välillä tapahtuu käyttökohteen mukaan. Esimerkiksi sormimallisten paristojen rakenne on sylinterikennomallinen, ja tämä on myös sähköajoneuvo- ja akkuvalmistaja Teslan suosima rakennemalli. Prismaattinen rakenne on käytössä esimerkiksi puhelimissa ja tietokoneissa. (15)

2.3.1 Sylinterikkenno

Sylinterimäinen kenno on yksi eniten käytetyin kennotyyppi sähköajoneuvoissa. Sen etuina on valmistuksen helppous ja hyvä mekaaninen vakaus. Sylinterikkenno kestää

myös hyvin sisäistä painetta, jota voi aiheutua akun ylikuumentumisesta. Tämäntyyppi-
sissä akuissa voidaan turvallisuussyistä olla ylikuumentumissuoja (PTC) ja ylipainevent-
tiili, jolla saadaan akun sisällä tapahtuva turpoaminen turvallisesti poistettua. Kertaluon-
teisen ylipaineventtiilin lauetessa akku kuivuu käyttökelvottomaksi, koska sen elektro-
lyytti pääsee vuotamaan venttiin kautta. Ylikuumentumissuojana toimii PTC-kytkin, joka
siirtyy johtamattomaan tilaan akun ylikuumentuessa. Ylikuumentuminen tapahtuu usein
kennon yli suuren lataus- tai purkuvirran johtamisen yhteydessä. Kun akku jäähtyy ja
oikosulku on saatu poistettua, PTC-kytkin palaa johtavaan tilaan. (15)

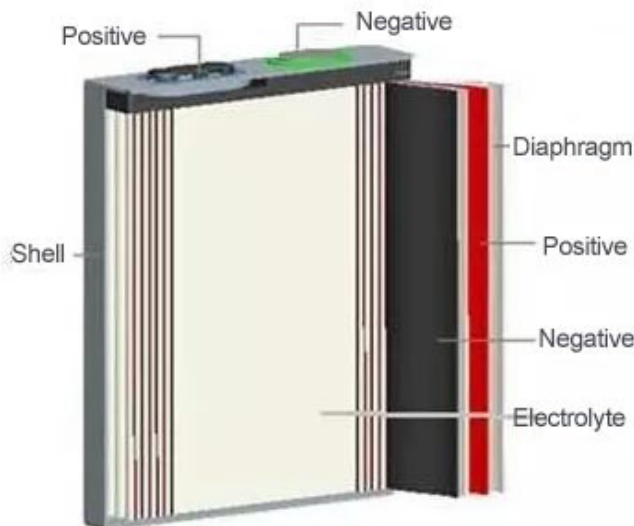
Sähköajoneuvoissa suosituimmaksi noussut 18650-sylinterikenno on pituudeltaan 65
mm ja halkaisijaltaan 18 mm. 18650-kennon elinkaari sähköajoneuvoissa alkaa olemaan
loppupäässä, koska uudeksi, paremmaksi ja halvemmaksi on tullut 21700-mallinen
kenno. Uuden 21700-sylinterikennon koko on kasvanut edelliseen 18650-kennoon näh-
den hieman, sillä sen pituus on 70 mm ja halkaisija 21 mm. (16, s. 8.)



Kuva 4. Sylinterimäinen kennorakenne (17).

2.3.2 Prismaattinen kenno

1990-luvulla esitelty prismaattinen kenno muistuttaa paljon sisällöltään sylinterimallista, mutta pakkaus tässä on toteutettu ohutta muotoilua muistuttavalla tavalla. Usein tämän tyyppinen akku on tehty juuri johonkin laitteeseen sopivaksi. Yleisin käyttökohde tällä kennomuotoilulla on matkapuhelimet, tabletit ja kannettavat tietokoneet. Sähköajoneuvoissa näitä on myös käytetty isoihin alumiinikuoriin pakattuina. Isompien kennojen kapasiteetti vaihtelee 20–50 Ah:n välillä, kun taas kannettavissa elektroniikkalaitteissa käytettävien kennojen kapasiteetti on 0,8–4 Ah. Normaalisti kennot turpoavat syklien aikana, minkä takia kannettavien elektroniikkalaitteiden akut on koteloitu muoviin suurimman turpoamisen estämiseksi. Turpoamisen yhteydessä usein akku muuttuu heikkokuntoisemmaksi ja sen kapasiteetti pienentyy. (17)

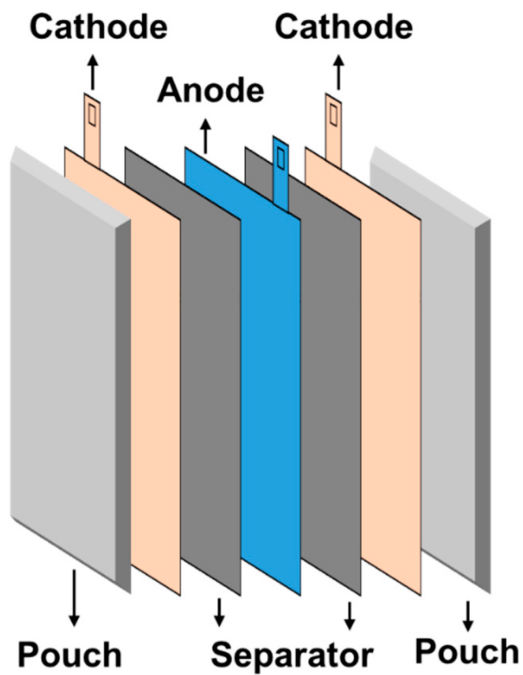


Kuva 5. Prismaattinen kennorakenne (17).

2.3.3 Pussikkenno

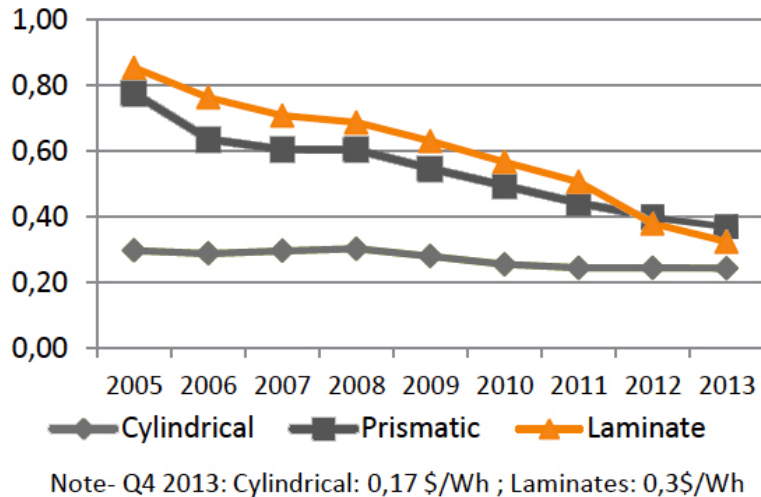
Vuonna 1995 julkaistu pussikennorakenne oli mieleinen uudistus akkumaailmaan muotoilunsa ja pakkaustehokkuuden ansiosta. Jopa 90–95 %:n tarkkuudella saavutettu kennon paketointi tekee tästä kevyen ja pussikkenno soveltuu mitä erinomaisimmin sähköajoneuvoissa käytettäväksi. Foliollevyjen ollessa hitsattuna elektrodihin ei tarvetta me-

tallikuorille ole, mikä esimerkiksi sylinterikennomallissa on lähes välttämätön. Pussirakenteen huonona puolena on vielä varsinkin pienien kennojen turpoaminen syklien jälkeen. Jo 500 syklin jälkeen on havaittu kennojen turpoamista 8–10 %, mutta isompien 40 Ah:n kennojen vastaava turpoaminen tapahtuu 5000 syklin kohdalla. Sen takia akustoja tehdessä on huomioitava koteloinnissa turpoaminen ja mahdollisten terävien reunojen aiheuttama repeytymä pussiin. (17.)



Kuva 6. Pussimainen kennorakenne (17).

Pussikennon ja prismaattisen kennorakenteen korkeat valmistuskustannukset ovat olleet aikaisemmin näiden esteenä yleistymiselle sähköajoneuvokäytössä. Uusien kehittyneiden valmistusprosessien ansiosta valmistuskustannuksia on saatu halvemmaksi, joten nämä kennorakenteet ajavat jatkuvasti itseänsä akkumarkkinoille yhä enemmän.



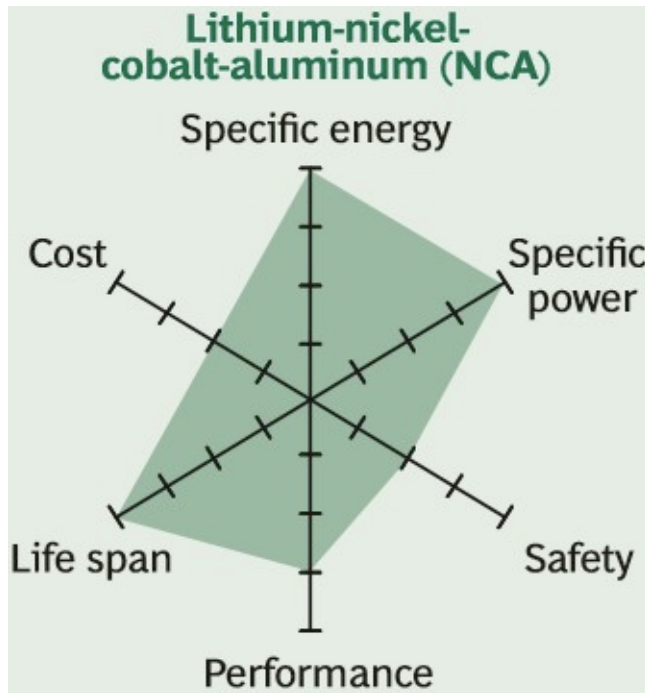
Kuva 7. Kennorakenteiden hinnan muutos vuosina 2005-2013 (17).

3 Akkuteknologian nykytilanne

3.1 Eri akkuteknologiat

3.1.1 NCA

Litium-nikkelikoboltti-alumiinioksidi on tullut erikoiskäyttöön jo vuonna 1999. NCA:n korkea energiatiheys, tehotehoisuus ja pitkä käyttöikä ovat sen vahvuuksia. Näiden takia se on noussut käytettäväksi sähköajoneuvoissa ja varsinkin sähköajoneuvo- ja akkuvalmistaja Tesla suosii tätä akkukemialla valmistamissaan akustoissaan. Heikkouksina voidaan pitää NCA:n epävakautta (kuva 8), jonka takia se vaatii erityistä turvallisuusvalvontaa varsinkin sähköajoneuvoissa käytettäessä. Kennon valmistuskustannusta nostattaa elektrodin valmistusmateriaalina käytettävä koboltti, jota Tesla on esimerkiksi vähentänyt kennoistaan jatkuvasti. Tulevaisuuden tähtäimessä Teslalla onkin kehittää koboltiton elektrodi. (18)

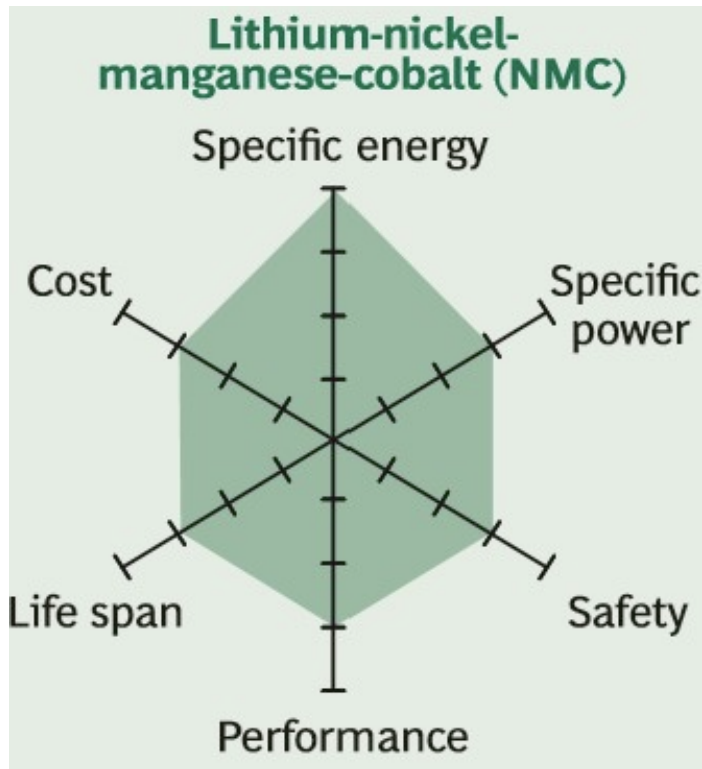


Kuva 8. Litium-nikkeli-koboltti-alumiiniakun tähtikuvio (18).

NCA-kennon nimellisjännite on 3,6 V, ja sen toiminta-alue on 3,0–4,2 V. Kennojen energiatiheys on 200–260 Wh/kg. (18)

3.1.2 NMC

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidista on tullut yksi yleisimmin käytetyistä litiumteknikoista sähköajoneuvoissa, koska sen valmistuskustannukset on saatu alhaisiksi. NMC-akussa löytyy paljon yhtäläisyyksiä NCA-teknologian kanssa, mutta NMC:tä pidetään turvallisempana varsinkin, kun kennon stabiiliutta on saatu parannettua yhdistämällä nikkeliä ja mangaania. Nikkeli itsessään tunnetaan hyvästä energiatiheystään, mutta huonosta stabiiliudestaan. Käytettävien materiaalien määrä kennossa vaihtelee valmistajan mukaan. Lisäksi NMC-kennon hyvinä puolina pidetään sen kykenemistä alhaisiin uudelleenvarautumisaikoihin. Kennon oletettu elinikä on 1000–2000 sykliä riippuen kennon purkaussyvyyksistä ja käyttölämpötilasta. Etuina sähköajoneuvoja ajatellen on niiden sisältämien yhdisteiden muokkaamalla saatava energiatiheys, hyvät lämpöominaisuudet ja stabiilius. Monet sähköautovalmistajat suosivat tällä hetkellä NMC-teknikkaa akustossaan. (18)



Kuva 9. Litium-nikkeli-mangaani-kobolttiakun tähtikuvio (18).

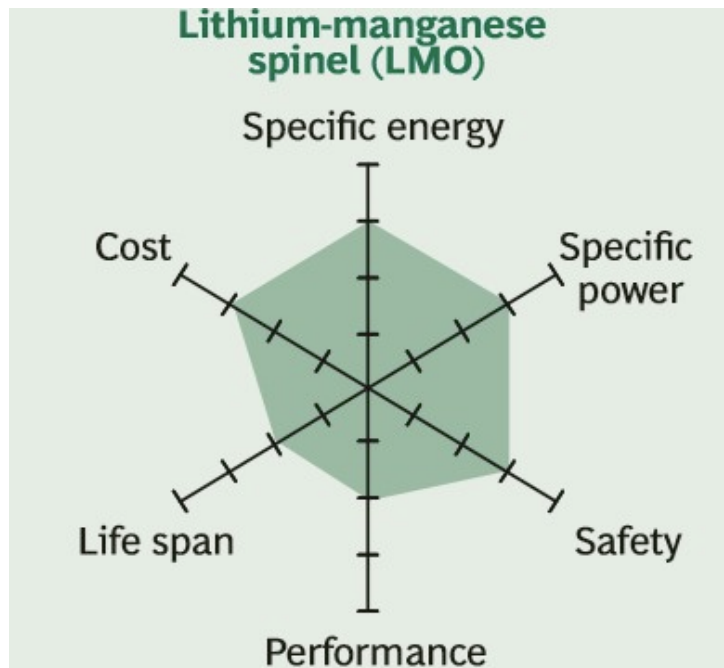
NMC-kennon nimellisjännite on 3,7 V, ja sen toiminta-alue on 3,0–4,2 V. Energiatiheys on 150–220 Wh/kg. (18)

3.1.3 LMO

Litiummangaanioksidi otettiin käyttöön ensimmäisen kerran 1980-luvun alussa, mutta kaupallistaminen tapahtui lähes 15 vuotta myöhemmin. Tämä arkkitehtuuri muodostuu kolmiulotteisesta spinellirakenteesta, joka mahdollistaa paremman ionien virtaamiseen elektrodissa, ja sen ansiosta akun sisäinen resistanssi on pienempi. Pienemmän sisäisen resistanssin ansiosta pystytään tuottamaan suurempaa purkausvirtaa ja mahdollistamaan nopeampaa lataamista. 18650-mallin LMO-kennoa voidaan purkaa jopa 20–30 A:n virralla ilman ylikuumenemisen vaaraa, sillä LMO:lla on hyvä lämpöstabiilius. Suurvirtaa purkaessa on huomioitava, ettei kennon lämpötila saa nousta yli 80 °C:n.

Viime aikoina kuitenkin LMO:ta on muunneltu ja sisällytetty siihen 30 % nikkeliä (LNMO). Tällä on saatu lisättyä energiatiheyttä, ja näin ollen teoreettinen energia on parantunut

huomattavasti. On silti epätodennäköistä, että LNMO-akut yleistyisivät käytettäväksi sähköajoneuvoissa. (18.)



Kuva 10. Litium-mangaanioksidiaakun tähtikuvio (18).

Kennon nimellisjännite on 3,7 V ja toiminta-alue 3,0–4,2 V. LMO akun energiatiheys on 100–150 Wh/kg. (18)

3.2 Vertailu

Sähköajoneuvoissa tällä hetkellä käytettävät litiumioniakkukemiat jakautuvat oikeastaan kahteen luokkaan: NMC ja NCA. Nämä ovat yleisimmät ja toimivimmat ratkaisut tällä hetkellä sähköajoneuvokäytössä, ja näitä valmistajat suosivatkin eniten. Sähköajoneuvo- ja akkuvalmistaja Tesla kehittää jatkuvasti NCA-teknologiaa esimerkiksi muuttamalla kennossa käytettäviä materiaaleja. Yleisesti ottaen muut autovalmistajat suosivat NMC teknologiaa, koska sillä pystytään saavuttamaan alhaisemmat valmistuskustannukset. LMO-teknologia oli suosiossa jo kauan sitten, kun sähköajoneuvoja alettiin tuomaan markkinoille, mutta huomattiin, ettei se pysty vastaamaan kilpailijoidensa NMC- ja NCA-teknologioiden ominaisuuksille.

Koboltin hintakehityksen ollessa ylöspäin on NMC- ja varsinkin NCA-tekniikan kehittämisessä tutkittu koboltin vähentämistä kennorakenteessa. Tesla ja Panasonic ovatkin onnistuneet tässä kehitystyössä erinomaisesti, sillä koboltin kulutusta on pystytty vähentämään vuosien 2012–2018 aikana liki 60 % (taulukko 1) samalla parantaen kennon energiatiheyttä.

NMC tekniikka tuli markkinoilla NMC111-seoksella, jossa nikkeliä, kobolttia ja mangaania oli yhtä suuri määrä. Valmistajat on onnistunut vähentämään jatkuvasti kennossa käytettävän koboltin määrää sillä uudemmassa NMC532-kennossa on 5 osaa nikkeliä, 3 osaa mangaania ja 2 osaa kobolttia. Huipentuma NMC-kemiassa tullaan toivottavasti näkemään NMC811-seoksessa, jossa koboltin osuus olisi enää 1 osa. Tätä kemialla käytävää kennoa ei vain ole vielä pystytty kaupallistamaan. Tällä hetkellä NMC-kemia ei pysty haastamaan NCA-kemiaa edes uusimmalla NMC811-seoksella. (19.)

Taulukko 1. Teslan NCA akustojen kehitys vuosien 2009–2018 välillä (19).

Teslan akut (NCA)	2009–2015	2016–2018	–2018
Akkukennon tyyppi	18650	18650	21700
Kobolttia per akku	11 kg	7 kg	4,5 kg
Anodi	Grafiitti	Grafiitti + pii (10–15 %)	Grafiitti + pii (>15 %)

4 Akkuteknologia tulevaisuudessa

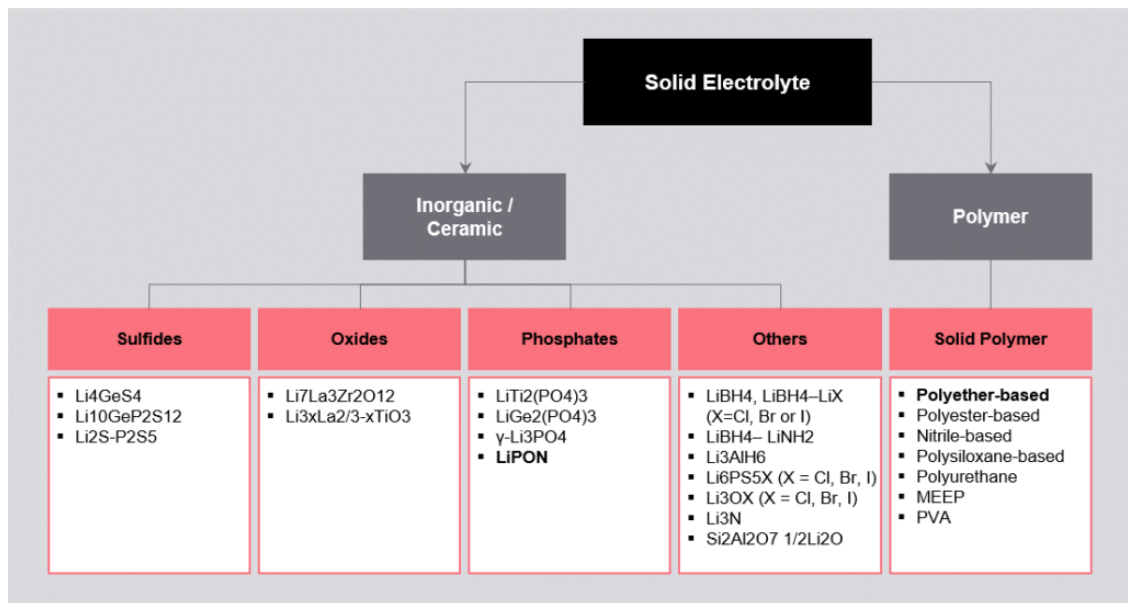
4.1 Eri akkuteknologiat

4.1.1 Litium solid-state

Alun perin kiinteän elektrolyytin litiumioniteknologia esiteltiin 1950-luvun loppupuolella. Kennojen jännitteiden ollessa vielä alhaisia ja energiatihedysten ollessa huono huomattiin silti, että niillä on hyvä mekaaninen stabiilius sekä pitkä käyttöikä. Vasta 2000-luvulla kiinteän elektrolyytin akut saatiin kehitettyä sellaisiksi, että se saavuttivat hyvän energiatihedysten ja saatiin aikaisemmin kalliit valmistuskustannukset halvemmaksi. Kennojen kokoa kasvattaessa ongelmaksi kehittyi elektrodien kestävyys, koska ne eivät kestäneet syklien aiheuttamaa tilavuuksien muutosta. Silti kiinteän elektrolyytin akkuteknologiaa pidetään lähitulevaisuuden mielenkiintoisimpana muutoksena sähköajoneuvomaailmassa ja sen uskotaan jopa korvaavan nestemäiset litiumioniakut, kun kestävyysongelmat on saatu ratkaistua. Tällä hetkellä tutkijoilla on vielä ratkaistavana lataus-purkusuoritus aikana tapahtuva tilavuuden muutos, joka rikkoo kennon toimintakyvyttömäksi ennen aikoja.

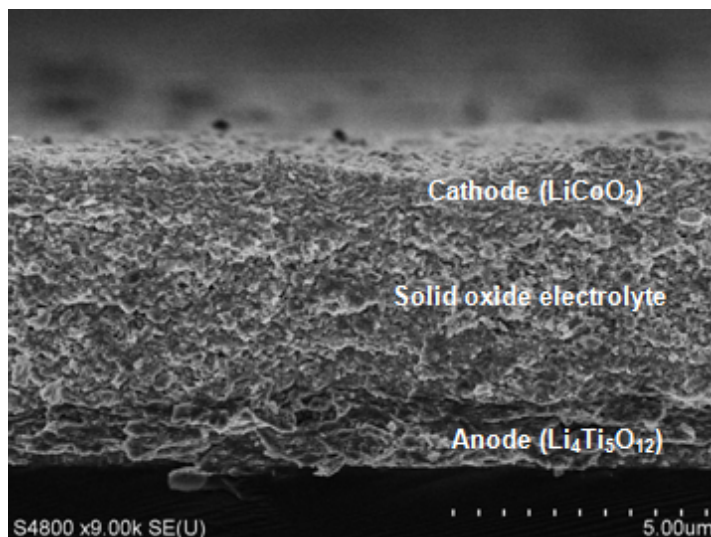
Kiinteän olomuodon akun toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin nestemäisen tai geelimäisen akun, mutta oleellisin ero näillä on elektrolyytinä käytettävän materiaalin olomuoto. Kun nestemäisessä tai geelimäisessä litiumioniakussa elektrolyytti on nestemäistä tai geelimäistä, niin kiinteän olomuodon akussa elektrolyytti on fyysisesti kiinteässä olomuodossa. Elektrolyytin ollessa kiinteässä olomuodossa kennojen turvallisuuskin on parempi, koska se ei aiheuta kennossa olevan nesteen vuotamisvaaraa ympäristölle tai käyttäjälle. (20.)

Kiinteän olomuodon elektrolyytin valmistusmateriaaleja on kehitetty jo yli 25 erityyppistä. (kuva 11). Ne voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: epäorgaaniset ja orgaaniset (polymeeri). Epäorgaanisiin kuuluu neljä luokkaa, joista tutkijoiden mielestä mielenkiintoisimmat pohjautuvat oksidiin tai sulfidiin. (21)



Kuva 11. Jo kehitettyjä kiinteitä elektrolyyttejä (21).

Nestemäisen ja geelimäisen litiumioniakun rakenteen koostuessa karkeasti neljästä eri osasta, positiivisesta ja negatiivinen elektrodista, elektrolyytistä ja erottimesta on kiinteän olomuodon akun rakenteessa elektrolyytti saatu jopa toimimaan myös erottajana (kuva 12). (21)



Kuva 12. Oksidipohjainen kiinteä elektrolyytin akku läpileikattuna (21).

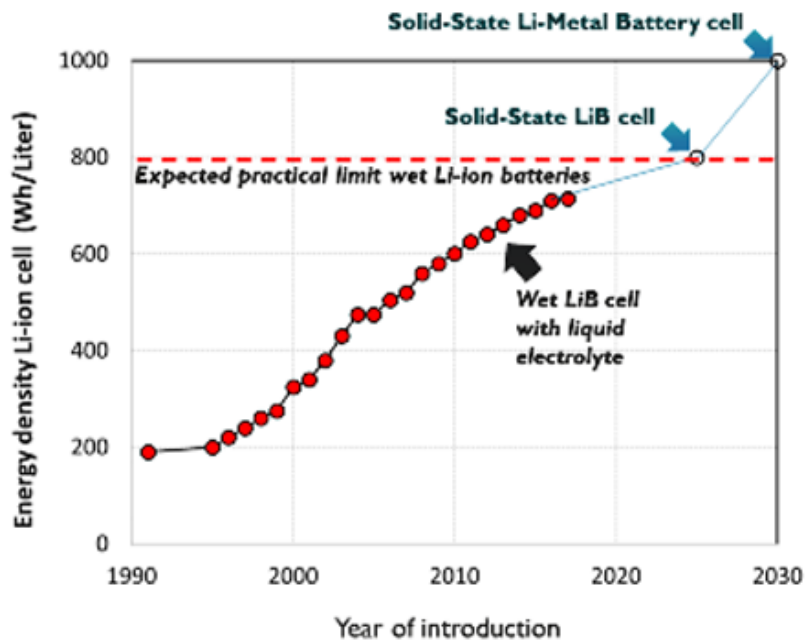
Taulukko 2. Yleisimpien oksidipohjaisten ja sulfidipohjaisten elektrolyyttien ominaisuuksia (22).

	Chemical composition	Lithium ion conductivity (S cm ⁻¹)	Use of lithium metal negative electrode	Use of high-potential positive electrode	Formation of interface with electrode	Denseness as component material	Safety
Oxide	Li ₇ La ₃ Zr ₂ O ₁₂	3.0 × 10 ⁻⁴	Possible	Possible	Difficult	Difficult	Safe
	La _{0.57} Li _{0.29} TiO ₃	6.8 × 10 ⁻⁴	Impossible	Possible	Difficult	Difficult	Safe
	Li _{1.3} Al _{0.3} Ti _{1.7} (PO ₄) ₃	7.0 × 10 ⁻⁴	Impossible	Possible	Possible	Possible	Safe
	Li _{2.9} PO _{3.3} N _{0.46}	3.3 × 10 ⁻⁶	Possible	Possible	Possible	Possible	Safe
	Li _{1.5} Al _{0.5} Ge _{1.5} (PO ₄) ₃	4.0 × 10 ⁻⁴	Possible	Possible	Possible	Possible	Safe
Sulfide	Li ₁₀ GeP ₂ S ₁₂	1.2 × 10 ⁻²	Impossible	Possible	Easy	Easy	Hydrogen sulfide gas produced
	Li ₇ P ₃ S ₁₁	1.0 × 10 ⁻²	Impossible	Possible	Easy	Easy	Hydrogen sulfide gas produced
	Standard: Current organic electrolyte solution	10 ⁻²	Impossible	Impossible	Easy	-----	Flammable

Taulukossa on esitetty oksidipohjaisten ja sulfidipohjaisten elektrolyyttien ionijohtavuus huoneenlämmössä 25 °C. Oksidi- ja sulfidipohjaisten elektrolyyttien on havaittu kykenevän hyvin tekniisiin ominaisuuksiin ja laajaan lämpötilaskaalan eikä niissä ole turvallisuutta ajatellen vuodon mahdollisuutta. Erityisesti sulfidipohjaisten elektrolyyttien tutkimuksia on lisätty, koska ne saavuttavat hyvän ionijohtavuuden, mutta haasteena on vielä sulfidin aiheuttama haitallisen rikkivedyn tuotto. Hyvän turvallisuuden takaavat taas oksidielekolytytit, mutta niillä on vielä suuret teoreettiset energiaerot eikä niiden ionijohtavuus ole niin hyvä kuin sulfidipohjaisissa. (22)

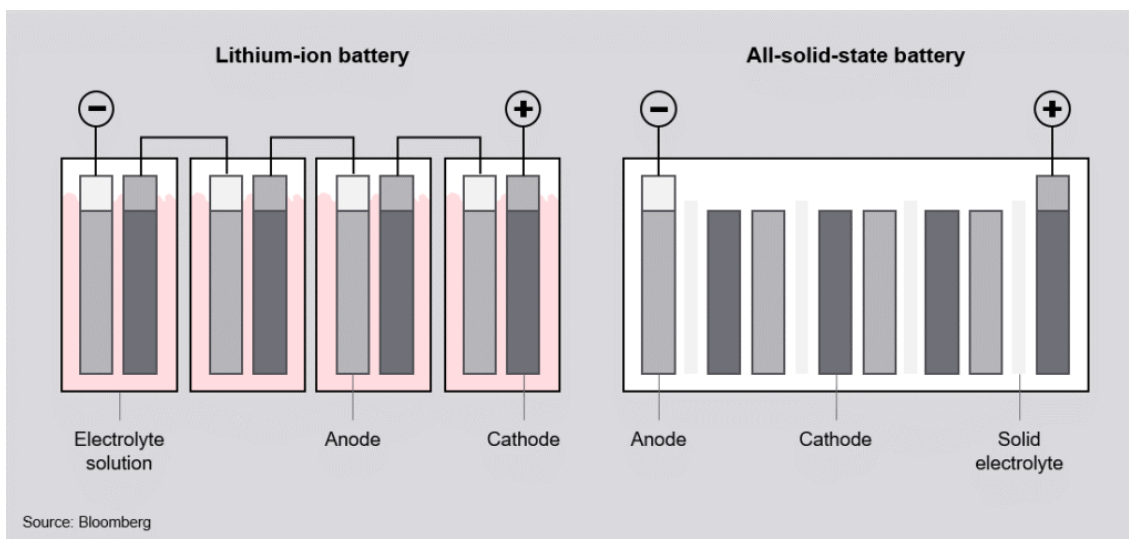
Nykyisten nestemäisten litiumioniakustojen heikon turvallisuuden, hitaan latautumisajan ja tarjoaman heikon toimintasäteen uskotaan olevan pidättävä tekijä sähköajoneuvojen läpimurtoon. Edellä mainittuihin ongelmiin kiinteän elektrolyytin akkuteknologian odotetaan tuovan ratkaisun näihin. Koska elektrolyytin ollessa kiinteässä olomuodossa ei latauksen aikana tapahdu elektrolyytinesteen ylikuumenemista, niin akun uudelleen varaamisaikaa pystytään lyhentämään, koska latausvirtaa voidaan kasvattaa perinteiseen nestemäiseen litiumioniakkuun verrattuna. Myös valmistuskustannusten uskotaan pienentyvän tietyn ajan jälkeen, koska rajoittavana tekijänä ei ole esimerkiksi kobolttin hinnan muutos, joka ajaa tällä hetkellä useamman nestemäisen litiumioniakuston valmistuskustannusta ylöspäin.

NMC- ja NCA-tekniologioiden kehittämisen ansiosta nestemäisten kennojen energiatiheys lähenee jo rajaa 300 Wh/kg, ja niiden maksimaalisen energiatiheyden saavuttaminen uskotaan tapahtuvan lähivuosien aikana. Kiinteän elektrolyytin litiumionikennon kehittyessä eteenpäin taas pidetään mahdollisena, että saavutettaisiin yli 500 Wh:n/kg energiatiheys (kuva 14), joka mahdollistaa sähköajoneuvoille arvioiden mukaan noin 700 km:n toimintasäteen yhdellä latauksella. (23)



Kuva 14. Nestemäisten litiumioni- ja kiinteän solid-state-kennojen energiatiheyden vertailua (23).

Energiatiheyden nostamiseen ei tarvitse akuston kokoa kasvattaa sillä kiinteän elektrolyytin akuston kennot voivat olla yhteydessä toisiinsa ilman erillistä kotelointia, mikä säästää merkittävästi akuston kokoa ja painoa (kuva 15).



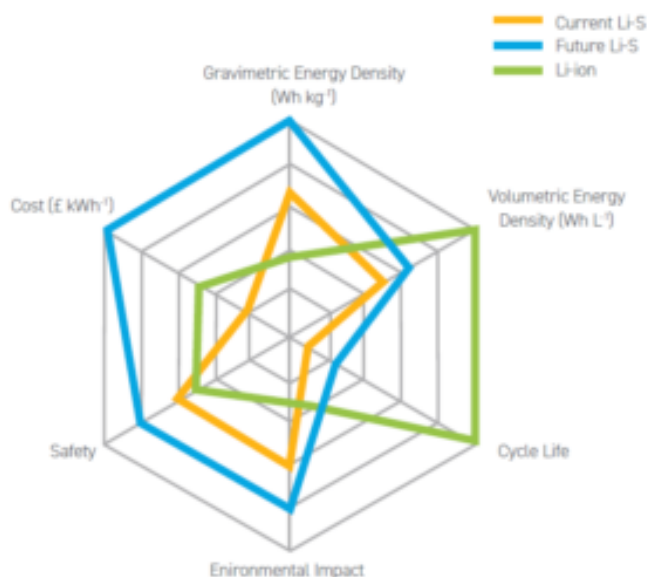
Kuva 15. Nestemäisen ja solid-state-akun kennon koteloinnin eroavaisuus (22).

Kiinteän olomuodon omaavien akkujen käyttökohteet eivät eroa nestemäisten akkujen käyttökohteista, ja niitä voidaan käyttää samoissa sovelluksissa. Ne soveltuvat energian varastointiin erinomaisesti, koska kiinteän elektrolyyttiakun itsepurkautumisnopeus on erittäin minimaalinen. (22)

4.1.2 Li-S

Litium-rikkiakku tuo mielenkiintoisen vaihtoehdon sähköajoneuvoille keveytensä ja alhaisten tuotantokustannustensa takia. Osaksi halvemmat tuotantokustannukset selittyvät sillä, ettei siinä tarvitse käyttää katodin materiaalina harvinaisia maametalleja vaan sen sijasta katodina käytetään rikkiä, jota saadaan esimerkiksi öljyntuotannon sivutuotteena. Vihreän energian kysynnän kasvaessa on suurten energiatihedden akkujen kehittäminen isossa roolissa. Litium-rikkikemian tärkeimpinä etuina pidetään sen hyvää energiatihedden mahdollisuutta. Teoriassa litium-rikkiakku pystyy sisällyttämään viisinkertaisesti energiaa painoonsa nähden. (24.) Tämä tarkoittaisi akuston pystyvän tarjoamaan energiaa esimerkiksi sähköajoneuvoille huomattavasti kauemmin yhdellä latauksella verrattuna nykyisiin markkinoilla oleviin litiumionitekniikoihin.

Figure 1: A comparison of the benefits toward key metrics offered by current and future Li-S and Li-ion battery technology



Kuva 16. Litium-rikkikennon tähtikuvio. Sininen väri edustaa tulevaisuuden kehitystä. (25)

Suurien energiakapasiteetin litium-rikkikenoja ei tulla todennäköisesti vielä näkemään sarjatuotannossa hetkeen, koska isona haasteena on tällä hetkellä saada syklien seurauksesta aiheutuva katodin rikkoutuminen estettyä. Siksi kestävyys onkin litium-rikkikakun huono puoli sarjatuotantoa ajatellen. Mahdollisesti litium-rikkikakkuja tullaan näkemään myös kulutuselektronikkakäytössä kuten matkapuhelimissa, joissa se voisi tarjota usean päivän käyttämisen ilman latauksia.

4.1.3 Li-Si

Litium-piiseosta on yritetty jo useiden vuosien aikana saada toimivaksi ratkaisuksi suurten energiakapasiteetin akkuihin. Pii anodimateriaalina pystyisi varastoimaan grafiittiin verrattuna jopa yhdeksän kertaa enemmän litiumioneita. Sen lisäksi alkuaineena piitä esiintyy maaperässä toiseksi eniten hapen jälkeen, joten anodimateriaalina sen kustannushinta jäisi alhaiseksi. (26.) Ongelma, jota tutkijat ovat yrittäneet ratkaista käytettäessä pelkästään piitä anodimateriaalina, on sen laajentuminen syklin aikana, mikä aiheuttaa kennon rikkoutumisen. Myös piin haittana on sen alhainen diffuusiokerroin ja korkea säh-

köresistiivisyys. Vaikka laajentuma ongelmaa ei ole vielä ratkaistu, ovat tutkijat kehittäneet erilaisia prosessointitekniikoita, joiden avulla piitä on saatu lisättyä grafiitin sekaan. Tällä tavalla onkin saatu sarjatuotantoon akkuja, joiden anodimateriaalina on sekoite grafiittia ja piitä. Tietenkään grafiitti-piiyhdistelmän kyky varastoida litiumioneita ei ole läheskään samanlainen kuin pelkästään piistä valmistetun anodin.

Onkin hyvin epätodennäköistä, että litium-piiakuteknologiaa tulnaisiin näkemään sähköajoneuvoissa vielä moneen vuoteen, mutta tutkijoiden usko piitä kohtaan on silti luottavainen, ja sen takia tällä hetkellä keskitytään hyödyntämään piitä nykyisten kemioiden parantamiseksi. Suomessa tutkijat on kehittäneetkin uuden huokoisista piimikropartikkeleista ja hiilinanoputkista koostuvan hybridimateriaalin, joka parantaa piin soveltuvuutta. (27)

4.2 Vertailu

Litium-pii- ja litium-rikkiakkukemioiden ollessa vielä kaukana, ennen kuin ne ovat valmiita julkaistavaksi sähköajoneuvokäyttöön, on kolmas esitelty vaihtoehto, kiinteän elektrolyytin akut, jo lähellä massasarjatuotantoa. Mercedes-Benz tiedotti 2020 syksyllä julkaisemansa omaan valikoimaansa kiinteän elektrolyytin akustolla varustetun sarjatuotantaisen sähköbussin. Akuston luvataan pystyvän tuomaan noin 25 % paremman energiatihedden verrattuna NMC-akkuihin varustettuna samaiseen bussiin. Takuuta akustolle luvataan 10 vuotta, joten valmistajan luottamus kiinteän elektrolyytin akkujen käyttöikäen ja luotettavuuteen on lupaava. Akustoa ei ole silti vielä saatu valmistettua, niin että se tukisi nopeaa latausta, jota kiinteän elektrolyytin akuilta odotettaisiin. (28)

Useat yritykset, kuten autovalmistaja Fisker ja Toyota sekä akkuvalmistajat Panasonic ja Samsung, ovat yrittäneet kehittää kyseistä teknologiaa julkaistavaksi, mutta eivät ole toistaiseksi saaneet julkaistua sarjatuotantoon kiinteän elektrolyytin akkuja. Tällä hetkellä Toyota on asettanut vuoden 2025 tavoitteeksi julkaista kiinteällä elektrolyytillä varustetun sähköajoneuvon. Myös Panasonic ja Samsung ovat ilmoittaneet tuovansa kiinteän elektrolyytin akut markkinoille lähivuosien aikana. (29)

5 Yhteenveto

Litiumioniakkujen käyttö soveltui alun perin pieniin elektroniikkalaitteisiin, minkä jälkeen tutkijat lähtivät kehittämään sitä ja hakemaan jatkuvasti uusia käyttökohteita sille. Tänä päivänä litiumioniakut pystyvätkin varastoimaan energiaa niin paljon, että ne soveltuvat käytettäväksi monenlaiseen käyttötarkoitukseen, eivät pelkästään toimimaan sähköajoneuvon energianlähteenä. Kysyntä on viime vuosien aikana noussut räjähdysmäisesti ja tuonut myös haittapuolia vaikeuttaen varsinkin kennon valmistusmateriaalien saamista. Tulevaisuudessa akkujen kysyntä ei varmastikaan tule laskemaan, koska ensimmäiset sähköajoneuvot alkavat vasta täyttämään vaativimpienkin käyttäjien asettamia kriteereitä, joten luontoystävällisempien valmistusmateriaalien kehittäminen olisi elintärkeää luontoa ajatellen.

Tutkielman pohjalta voidaan päätellä akkuteknologian olevan jatkuvassa kehityksessä, joten on mielenkiintoista nähdä, mikä tulee olemaan parhaiten soveltuva akkuteknologia sähköajoneuvokäytössä. Työssä esitetyt nykyhetken akut alkavat saavuttamaan energiatihedeltään maksimaaliset ylärajat, joten tarve kehittää uusia akkukemioita on suuri. Mielenkiintoisimmaksi ja lähimpänä kaupallistamista tutkielman perusteella ovat kiinteän elektrolyytin litiumioniakut. Kennojen energiatihetyksien noustessa suurimmaksi ongelmaksi pystyi tutkielman perusteella havaitsemaan syklien aikana aiheutuvan tilavuuksien muutoksen aiheuttavan akun ennenaikaisen rikkoutumisen. Sama kestävyys ongelma pystyttiin havaitsemaan myös muissa esitetyissä tulevaisuuden akkuteknologioissa.

Tässä tutkielmassa tarkoituksena oli saada selvitys tämänhetkisistä käytössä esiintyvistä akkuteknologioista sähköajoneuvoissa ja esittää tulevaisuudessa nähtäviä teknologioita. Näiden osalta tutkielman tavoitteet saavutettiin hyvin. Tutkielmassa pystyttiin esittämään vasta murto-osa mahdollisesti tulevaisuudessa nähtävistä akkuteknologioista, joten tutkielmaa olisi mahdollista laajentaa ja esittää erilaisia tulevaisuuden teknologioita. Siksi uusia teknologioita käsittelevien tutkielmien jatkuvuutta on hyvä saada tuotettua tasaisin väliajoin, joita esimerkiksi akkuteknologiasta kiinnostuneet henkilöt voisi hyödyntää.

Lähteet

- 1 History and timeline of the battery. Verkkoaineisto. Thoughtco. <<https://www.thoughtco.com/battery-timeline-1991340>>. Luettu 28.8.2020.
- 2 A Review of anode material for lithium-ion batteries. Verkkomateriaali. IOPscience. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1362/1/012026/pdf>>. Luettu 6.9.2020.
- 3 Teknistä tietoa. Verkkoaineisto. Exide. <https://exide.fi/wp-content/uploads/sites/15/2014/11/Exide_fi_Teknisk_info.pdf>. Luettu 11.11.2020.
- 4 Kaikki mitä sinun tarvitsee tietää akuista. Verkkoaineisto. Akkuhuolto. <<https://www.akuhuolto.fi/lyhyt-akutietoisku>>. Luettu 30.8.2020.
- 5 Reuters. Panasonic aims to boost energy density in Tesla batteries by 20%. Verkkoaineisto. Autoblog. <<https://www.autoblog.com/2020/07/30/panasonic-boost-tesla-battery-density/>>. Luettu 3.9.2020.
- 6 Dincer Ibrahim, Hamut S. Halil. 2017. Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems. E-kirja. ProQuest Ebook.
- 7 Worldwide number of battery electric vehicle in use from 2012 to 2019. Verkkoaineisto. Statista. <<https://www.statista.com/statistics/270603/worldwide-number-of-hybrid-and-electric-vehicles-since-2009>>. Luettu 17.11.2020.
- 8 Electrolyte lithium hexafluorophosphate for lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. Medium. <<https://medium.com/@nanografi/electrolyte-lithium-hexafluorophosphate-for-lithium-ion-batteries-9cf9e3f5334a>>. Luettu 16.11.2020.
- 9 What is the function of the separator? Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_306_battery_separators>. Luettu 17.11.2020.
- 10 A Review of anode material for lithium-ion batteries. Verkkomateriaali. IOPscience. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1362/1/012026/pdf>>. Luettu 6.9.2020.
- 11 Nanostructured anode materials for lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. pubs.rsc. <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2017/ta/c7ta05283a#!divAbstract>>. Luettu 15.9.2020.

- 12 Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries. Verkkoaineisto. Sciencedirect. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1002007118307536>>. Luettu 17.11.2020.
- 13 Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. Verkkoaineisto. mdpi. <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1074>>. Luettu 15.9.2020.
- 14 Understanding lithium-ion. Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <https://batteryuniversity.com/learn/archive/understanding_lithium_ion>. Luettu 21.9.2020.
- 15 Types of battery cells. Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 17.11.2020.
- 16 Sähköautot ja satakunnan teknologiametalliklusteri. Verkkoaineisto. Prizz. <<https://www.prizz.fi/media/teknologiametallit/teknologiametallit-materiaalit/sahkoautot-ja-satakunnan-teknologiametalliklusteri.pdf>>. Luettu 17.11.2020.
- 17 Types of battery cells. Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells>. Luettu 23.9.2020.
- 18 Types of lithium-ion. Verkkoaineisto. Batteryuniversity. <https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion>. Luettu 23.9.2020.
- 19 Sähköauton tekniikkaa osa 1. Verkkoaineisto. tyyliniekkä. <<https://tyyliniekkä.fi/sahkoauton-tekniikkaa-osa-1-akkukemiaa>>. Luettu 5.11.2020.
- 20 What is solid state battery? Verkkoaineisto. qnovo. <<https://qnovo.com/125-what-is-a-solid-state-battery/>>. Luettu 5.10.2020.
- 21 A possible replacement for conventional liquid lithium-ion batteries in electric vehicles. Verkkoaineisto. Futurebridge. <<https://www.futurebridge.com/blog/solid-state-batteries/>>. Luettu 18.10.2020.
- 22 Development of a compact all solid-state lithium secondary battery using single crystal electrolyte. Verkkomateriaali. aist.go. <https://www.aist.go.jp/pdf/aist_e/synthesisiology_e/vol12_no1/vol12_01_p29_p40.pdf>. Luettu 19.10.2020.
- 23 Solid-state battery tech for electric cars. Verkkoaineisto. eenewseurope. <<https://www.eenewseurope.com/news/solid-state-battery-tech-electric-cars-key-greater-autonomy>>. Luettu 19.10.2020.

- 24 Long-lasting lithium-sulfur battery promises to double ev range. Verkkoaineisto. spectrum.ieee. <<https://spectrum.ieee.org/energywise/energy/batteries-storage/lithium-sulfur-battery-news-ev-electric-vehicle-range>>. Luettu 22.10.2020.
- 25 Lithium-sulfur batteries. Verkkoaineisto. faraday.ac. <<https://faraday.ac.uk/lis-advantages/>>. Luettu 25.10.2020.
- 26 Tesla battery day. Verkkoaineisto. Tesla. <<https://www.youtube.com/watch?v=l6T9xleZTds>>. Luettu 18.10.2020.
- 27 New hybrid material improves the performance of silicon in li-ion batteries. Verkkoaineisto. uef. <<https://www.uef.fi/en/article/new-hybrid-material-improves-the-performance-of-silicon-in-li-ion-batteries>>. Luettu 18.10.2020.
- 28 Fully electric mercedes-benz ecitaro g articulated bus complements the electric range from Daimler buses. Verkkoaineisto. Mercedes-Benz-Bus. <https://www.mercedes-benz-bus.com/en_GB/brand/news/2020/fully-electric-ecitaro-g-complements-electric-range-from-daimler-buses.html>. Luettu 7.11.2020.
- 29 Toyota`s solid-state battery set to revolutionize evs and electronics. Verkkoaineisto. intelligentliving. <<https://www.intelligentliving.co/toyotas-solid-state-battery/>>. Luettu 7.11.2020.